

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y
Servicios de Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño e implementación de antenas MIMO de banda ancha
con filtros de rechazo de bandas**

**Autor: Darío Castro Carreras
Tutor: Bazil Taha Ahmed**

Julio 2019

Diseño e implementación de antenas MIMO de banda ancha con filtros de rechazo de bandas

AUTOR: Darío Castro Carreras

TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)

Dpto. de Tecnología electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Julio de 2019

Resumen

En el Trabajo Fin de Grado, (en adelante TFG), desarrollado, se ha procedido al diseño, construcción física y medida de antenas Ultra Wide Band (UWB) junto con la tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output), con filtros de rechazo de bandas (filtros notch), en frecuencias utilizadas en servicios que puedan causar interferencias con la banda UWB.

Se comenzó con el diseño del elemento unitario sin filtros el cuál, cumple estrictamente los requisitos propios de la banda UWB, definida en este trabajo posteriormente, e incluso se consideró apropiado aumentar dicha banda de trabajo para ser compatible con un mayor número de sistemas de comunicaciones.

Tras el correcto diseño del elemento unitario se le añadieron los filtros que actúan en las frecuencias que se plantean en el TFG basándose en la teoría, para después ajustar a lo deseado mediante la práctica.

Estos pasos anteriores tienen como objeto final el diseño de las antenas MIMO compuestas por las UWB con filtros notch. En el presente TFG se desarrollan antenas MIMO de dos y cuatro elementos.

Por último, se construyeron la antena UWB con filtros notch y los elementos de dos y cuatro antenas UWB en el Laboratorio de Circuitos Impresos de la Escuela Politécnica de la Universidad Autónoma de Madrid y la posterior medida de los parámetros S y diagramas de radiación de dichos componentes en la cámara anecoica propiedad del Grupo de RFCAS. Para realizar dichas medidas, es necesario soldar conectores de tipo SMA a la línea de alimentación de los componentes.

El objetivo final del TFG es hacer una comparativa entre los resultados que se obtienen mediante la simulación de las antenas y las medidas resultantes de la cámara anecoica.

Para la realización del diseño de las antenas y la posterior simulación de los resultados, se utiliza el programa CST (Computar Simulation Technology) y para tratar los datos de las mediciones se utiliza el programa MATLAB.

Abstract

In the development of this Bachelor Thesis (onwards BT) the design, physical construction and the measurement of Ultra Wide Band Antennas (UWB) with the MIMO (Multiple Input Multiple Output) technology and notch filters in the frequencies used in services that may cause interferences have been proceeded.

It has been started with the design of the unitary element which strictly complies with the UWB band proper requirements, defined later in this thesis; even it has been considered appropriate to increase the work band to be compatible with a more number of communication systems.

After the design of the unitary element, it has been added the filters that acts in the posed frequencies in the BT based on theory, to then adjust to the desired by practice.

These previous steps have as final object the design of the MIMO antennas composed by the UWB with notch filters. In the present BT it has been developed two and four element antennas.

Lastly, an UWB antennas with notch filters and two and four UWB elements have been fabricated in the Printed Circuits Laboratory of the Escuela Politécnica of the Universidad Autónoma de Madrid and the subsequent measurement of the S parameters and radiation patterns of said components in the anechoic chamber owned by the RFCAS group. To perform these measurements, it is necessary to weld SMA connectors to the feeding line of the antennas.

The final goal of the BT is to make a comparative between the simulations results and the measurements resulting by the anechoic chamber.

For the design of the antennas and the simulations of the results, the program CST (Computer Simulation Technology) has been used. For the data treatment of the measurements results, the program MATLAB has been used.

Palabras clave

Antena, UWB, filtros notch, MIMO, patch, parámetros S

Keywords

Antenna, UWB, notch filters, MIMO, patch, S-parameters

Agradecimientos

Es debido agradecer primero a las personas más importantes en mi vida que son mi padre Ernesto, mi madre Rocío, mi novia Diana y mis amigos los cuales son imprescindibles para mí.

Me gustaría también acordarme de mis compañeros de trabajo de Hispasat, en concreto de mi tutor Álvaro Villalobos.

Ahora que llega mi fin en la etapa universitaria en lo que a la carrera se refiere, mirando hacía atrás veo cosas que echaré de menos y que nunca volverán a ocurrir.

Por último y no por ello menos importante, me gustaría agradecer a mi tutor Bazil Taha Ahmed su esfuerzo, dedicación y disponibilidad para aclararme las dudas (que no son pocas) y a Eduardo García Marín por haberme ayudado con la construcción y medida de los componentes y a los profesores José Luis Masa Campos, Jorge Alfonso Ruiz, Juan Córcoles y el ya mencionado Bazil Taha por su entrega en la vida docente y por fabricar en mí el interés en el área de la radiofrecuencia.

Darío Castro Carreras

Contenido

| | | |
|-------|--|-------|
| 1 | Introducción..... | 1 |
| 1.1 | Motivación del trabajo..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos..... | 2 |
| 1.3 | Organización de la memoria..... | 2 |
| 2 | Teoría..... | 3 |
| 2.1 | Fundamentos teóricos de las antenas | 3 |
| 2.1.1 | Concepto de antena..... | 3 |
| 2.1.2 | Parámetros básicos | 4 |
| 2.1.3 | Tipos de antenas | 10 |
| 2.2 | Tecnología Microstrip | 12 |
| 2.2.1 | Introducción..... | 12 |
| 2.2.2 | Fundamentos de la tecnología microstrip..... | 13 |
| 2.2.3 | Formas de alimentación..... | 14 |
| 2.2.4 | Ventajas e inconvenientes de la tecnología microstrip..... | 15 |
| 2.3 | Tecnología UWB | 15 |
| 2.3.1 | Introducción..... | 15 |
| 2.3.2 | Características de la tecnología UWB..... | 16 |
| 2.3.3 | Ventajas y desventajas de la tecnología UWB | 17 |
| 2.4 | Filtros notch | 18 |
| 2.4.1 | Compatibilidad con otros sistemas de comunicaciones | 18 |
| 2.4.2 | Tipos de filtros notch..... | 18 |
| 2.5 | Tecnología MIMO | 20 |
| 2.5.1 | Introducción..... | 20 |
| 2.5.2 | Concepto de MIMO..... | 20 |
| 2.5.3 | Ventajas de la tecnología MIMO..... | 21 |
| 3 | Criterios de diseño, flujo de trabajo y diseño | 22 |
| 3.1 | Sustrato utilizado | 22 |
| 3.2 | Criterios de diseño..... | 22 |
| 3.3 | Flujo de trabajo..... | 23 |
| 4 | Diseño..... | 25 |
| 4.1 | Elemento unitario sin filtros | 25 |
| 4.2 | Elemento unitario con filtros notch | 26 |
| 4.3 | MIMO dos elementos con filtros notch..... | 28 |
| 4.4 | MIMO cuatro elementos con filtros notch | 29 |
| 5 | Construcción y medida de las antenas | 30 |
| 5.1 | Construcción de las antenas..... | 30 |
| 5.2 | Medidas de las antenas | 31 |
| 5.3 | Discusión de los resultados | 38 |
| 6 | Conclusiones y trabajo futuro..... | 39 |
| 6.1 | Conclusiones..... | 39 |
| 6.2 | Trabajo futuro | 39 |
| | Referencias | 40 |
| | Anexos..... | XLIII |
| A | Efecto del taper..... | XLIII |
| B | Variación parámetros de los filtros | XLIV |
| C | Inserción de componentes aislantes entre elementos..... | XLVI |

| | |
|---|------|
| D Variación del radio circunferencia central..... | XLIX |
| E Simulación hasta 50 GHz..... | LI |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN | 3 |
| FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO RADIADO | 4 |
| FIGURA 3. DIAGRAMAS DE RADIACIÓN TÍPICOS..... | 4 |
| FIGURA 4. ESQUEMA DE UN CUADRIPOLO | 6 |
| FIGURA 5. ESQUEMA DE UN CUADRIPOLO CON ONDAS INCIDENTES Y REFLEJADAS Y MATRIZ DE PARÁMETROS S..... | 6 |
| FIGURA 6. ESQUEMA DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON GENERADOR Y CARGA | 7 |
| FIGURA 7. DIPOLO | 10 |
| FIGURA 8. MONOPOLO..... | 10 |
| FIGURA 9. ANTENA IMPRESA RECTANGULAR | 11 |
| FIGURA 10. TIPOS FRECUENTES DE FORMAS DE ANTENAS DE PARCHE | 11 |
| FIGURA 11. ANTENA REFLECTORA..... | 11 |
| FIGURA 12. ANTENA DE BOCINA..... | 11 |
| FIGURA 13. ARRAY DE ANTENAS DE BOCINA | 12 |
| FIGURA 14. ARRAY DE ANTENAS DE PARCHE | 12 |
| FIGURA 15. ANTENA DE PARCHE SOBRE TECNOLOGÍA MICROSTRIP | 13 |
| FIGURA 16. ESTRUCTURA MICROSTRIP | 13 |
| FIGURA 17. PARCHE ALIMENTADO POR Sonda COAXIAL | 14 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 18. PARCHE CON ALIMENTACIÓN MICROSTRIP INTRODUCIDA EN EL PARCHE | 14 |
| FIGURA 19. PARCHE CON ALIMENTACIÓN MICROSTRIP | 14 |
| FIGURA 20. COMPARATIVA ENTRE EL ANCHO DE BANDA OCUPADO Y LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA DE DIFERENTES SISTEMAS DE COMUNICACIÓN | 16 |
| FIGURA 21. COMPARATIVA ENTRE LA VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE DATOS Y LA DISTANCIA QUE PUEDEN ALCANZAR DIFERENTES TIPOS DE SISTEMAS DE COMUNICACIÓN | 17 |
| FIGURA 22. FILTRO EXTERNO AL PARCHE..... | 19 |
| FIGURA 23. FILTRO INTERNO AL PARCHE | 19 |
| FIGURA 24. FILTRO EN LÍNEA DE ALIMENTACIÓN | 20 |
| FIGURA 25. FILTRO EN PLANO DE MASA..... | 20 |
| FIGURA 26. MODEM CON ANTENAS MIMO..... | 20 |
| FIGURA 27. ESQUEMA DE UN SISTEMA MIMO | 20 |
| FIGURA 28. DIAGRAMA DE FLUJO ANTENAS CON FILTROS..... | 23 |
| FIGURA 29. DIAGRAMA DE FLUJO ANTENAS MIMO CON FILTROS..... | 24 |
| FIGURA 30. REPRESENTACIÓN DEL ELEMENTO UNITARIO | 25 |
| FIGURA 31. PARÁMETRO S_{11} DEL ELEMENTO UNITARIO SIN FILTROS..... | 26 |
| FIGURA 32. REPRESENTACIÓN DEL ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH | 26 |
| FIGURA 33. PARÁMETRO S_{11} DEL ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH | 27 |
| FIGURA 34. REPRESENTACIÓN MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 28 |
| FIGURA 35. PARÁMETROS S_{11} & S_{12} DE MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 28 |
| FIGURA 36. REPRESENTACIÓN MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 29 |
| FIGURA 37. PARÁMETROS S_{11} & S_{21} & S_{31} & S_{42} DE MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH..... | 30 |
| FIGURA 38. PARTE FRONTAL ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH | 30 |
| FIGURA 39. PARTE POSTERIOR ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH | 30 |
| FIGURA 40. PARTE POSTERIOR MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 31 |
| FIGURA 41. PARTE FRONTAL MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 31 |
| FIGURA 42. PARTE FRONTAL MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 31 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 43. PARTE POSTERIOR <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH..... | 31 |
| FIGURA 44. CONECTOR TIPO SMA | 31 |
| FIGURA 45. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{11} MEDIDA VS SIMULACIÓN ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH.. | 32 |
| FIGURA 46. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{11} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 32 |
| FIGURA 47. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{12} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 32 |
| FIGURA 48. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{21} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 32 |
| FIGURA 49. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{22} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 32 |
| FIGURA 50. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{11} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 33 |
| FIGURA 51. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{12} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 33 |
| FIGURA 52. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{14} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 33 |
| FIGURA 53. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{13} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 33 |
| FIGURA 54. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{21} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 33 |
| FIGURA 55. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{22} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 33 |
| FIGURA 56. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{23} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 34 |
| FIGURA 57. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{24} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 34 |
| FIGURA 58. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{32} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 34 |
| FIGURA 59. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{31} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 34 |
| FIGURA 60. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{33} MEDIDA VS SIMULACIÓN <i>MIMO</i> CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 34 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 61. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{34} MEDIDA VS SIMULACIÓN MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 34 |
| FIGURA 62. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{42} MEDIDA VS SIMULACIÓN MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 35 |
| FIGURA 63. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{41} MEDIDA VS SIMULACIÓN MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 35 |
| FIGURA 64. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{43} MEDIDA VS SIMULACIÓN MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 35 |
| FIGURA 65. COMPARATIVA PARÁMETRO S_{44} MEDIDA VS SIMULACIÓN MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 35 |
| FIGURA 66. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 4.5 GHz | 36 |
| FIGURA 67. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 3 GHz | 36 |
| FIGURA 68. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 15 GHz | 36 |
| FIGURA 69. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 10 GHz | 36 |
| FIGURA 70. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 3 GHz | 36 |
| FIGURA 71. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 3 GHz | 36 |
| FIGURA 72. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 15 GHz | 37 |
| FIGURA 73. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 10 GHz | 37 |
| FIGURA 74. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 4.5 GHz..... | 37 |
| FIGURA 75. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 3 GHz..... | 37 |
| FIGURA 76. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 15 GHz..... | 37 |
| FIGURA 77. DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH A FRECUENCIA DE 10 GHz..... | 37 |

| | |
|---|--------|
| FIGURA 78. PARÁMETROS S_{11} VARIACIÓN ANCHURA DEL TAPER..... | XLIII |
| FIGURA 79. PARÁMETROS S_{11} VARIACIÓN DE LA LONGITUD | XLIV |
| FIGURA 80. PARÁMETROS S_{11} VARIACIÓN DE LA ANCHURA | XLV |
| FIGURA 81. PARÁMETROS S_{11} VARIACIÓN DE LA POSICIÓN..... | XLVI |
| FIGURA 82. PARÁMETROS S_{11} COMPARACIÓN SIN/CON BARRERA..... | XLVI |
| FIGURA 83. PARÁMETROS S_{21} COMPARACIÓN SIN/CON BARRERA..... | XLVII |
| FIGURA 84. PARÁMETROS S_{11} VARIACIÓN SEPARACIÓN PLANO DE MASA | XLVII |
| FIGURA 85. PARÁMETROS S_{21} VARIACIÓN SEPARACIÓN PLANO DE MASA | XLVIII |
| FIGURA 86. PARÁMETROS S_{11} COMPARACIÓN SIN/CON CÍRCULOS | XLVIII |
| FIGURA 87. PARÁMETROS S_{21} COMPARACIÓN SIN/CON CÍRCULOS | XLIX |
| FIGURA 88. PARÁMETROS S_{11} VARIACIÓN DEL RADIO INTERNO DE LA CIRCUNFERENCIA | XLIX |
| FIGURA 89. PARÁMETROS S_{21} VARIACIÓN DEL RADIO INTERNO DE LA CIRCUNFERENCIA | L |
| FIGURA 90. PARÁMETROS S_{31} VARIACIÓN DEL RADIO INTERNO DE LA CIRCUNFERENCIA | L |
| FIGURA 91. PARÁMETROS S_{41} VARIACIÓN DEL RADIO INTERNO DE LA CIRCUNFERENCIA | L |
| FIGURA 92. PARÁMETROS S_{11} & S_{21} MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH HASTA 50GHZ..... | LI |
| FIGURA 93. PARÁMETROS S_{11} & S_{21} & S_{31} & S_{41} MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH HASTA 50GHZ ... | LI |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. SIGNIFICADO FÍSICO DE LOS PARÁMETROS S | 7 |
| TABLA 2. DIVISIÓN DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO..... | 9 |
| TABLA 3. DIVISIÓN DE LA BANDA FRECUENCIAL DE LAS MICROONDAS | 10 |
| TABLA 4. PARÁMETROS DE PARCHE MICROSTRIP | 13 |
| TABLA 5. PARÁMETROS DEL ELEMENTO UNITARIO SIN FILTROS..... | 25 |
| TABLA 6. PARÁMETROS DEL ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH | 26 |
| TABLA 7. MARCADORES DE FRECUENCIA ELEMENTO UNITARIO CON FILTROS NOTCH | 26 |
| TABLA 8. MARCADORES DE FRECUENCIA MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH | 28 |

| | |
|---|-----------|
| <i>TABLA 9. PARÁMETROS DE MIMO DOS ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH</i> | <i>28</i> |
| <i>TABLA 10. MARCADORES DE FRECUENCIA MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH</i> | <i>29</i> |
| <i>TABLA 11. PARÁMETROS DE MIMO CUATRO ELEMENTOS CON FILTROS NOTCH.....</i> | <i>29</i> |

1 Introducción

1.1 Motivación del trabajo

Los aparatos electrónicos se han convertido en utensilios que son utilizados por las personas de manera cotidiana. Uno de los indicadores que ejemplifica esta extensión en la sociedad es el uso del teléfono móvil. En España, en el año 2018, el 98% de los hogares poseían al menos un dispositivo móvil de comunicación [1]. Este auge casi exponencial reside en el deseo por parte de las personas de obtener información y poder comunicarse de manera instantánea.

Las antenas son la parte esencial para que sea posible la comunicación ya que se encargan de transformar la energía guiada de una línea de transmisión a energía radiada que será transportada por los campos electromagnéticos.

Si nos fijamos en las residencias particulares, empresas y centros públicos, es más que probable que exista en dichos sitios la posibilidad de tener conectividad inalámbrica. Si comparamos estas redes inalámbricas con las redes tradicionales vía cable, existe un aspecto fundamental en el cual las redes cableadas tienen una gran ventaja: la transferencia y velocidad de los datos.

En este sentido, las antenas UWB, son una gran apuesta para los sistemas de comunicaciones sin cables ya que pueden permitir una mayor cantidad de transferencia de datos debido principalmente al gran ancho de banda que posee este sistema de comunicaciones.

Para poder mejorar la coexistencia con estos sistemas inalámbricos, se pueden eliminar determinadas frecuencias en las que trabajen otros posibles sistemas interferentes mediante el uso de filtros notch o de eliminación de bandas.

Por último, con la utilización de una tecnología que sea capaz, como es la tecnología MIMO, de aumentar la eficiencia y la cobertura entre otros aspectos, de los sistemas inalámbricos, podremos conseguir una red fiable, con unas prestaciones magníficas de cara al usuario y que en resumen pueda, competir de alguna manera con las velocidades y transmisión de datos de las redes de datos clásicas.

1.2 Objetivos

En este TFG podemos considerar los siguientes objetivos:

- Diseño del elemento unitario que cumpla los requisitos de la banda de frecuencias UWB
- Aunar el elemento unitario con los filtros notch para eliminar las frecuencias no deseadas
- Elaboración de las antenas MIMO de dos y cuatro elementos UWB con filtros notch
- Construcción de las antenas
- Medición de los parámetros S y diagramas de radiación de las antenas
- Discusión de los valores medidos

1.3 Organización de la memoria

Esta memoria está dividida en los siguientes apartados:

- Teoría
 - Fundamentos teóricos de las antenas
 - Tecnología Microstrip
 - Tecnología UWB
 - Filtros notch
 - Tecnología MIMO
- Criterios de diseño y flujo de trabajo
- Diseño
 - Diseño elemento unitario
 - Diseño elemento unitario con filtros notch
 - Antena MIMO dos elementos
 - Antena MIMO cuatro elementos
- Medidas Cámara Anecoica
- Discusión de resultados

2 Teoría

2.1 Fundamentos teóricos de las antenas [2][3][4]

2.1.1 Concepto de antena

Según el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) una antena es una parte de un sistema transmisor y/o receptor diseñado específicamente para recibir y/o radiar ondas electromagnéticas. [5]

Otra definición que le puede ser aplicada es la de ser la región entre un medio guiado, donde está presente una onda electromagnética confinada y el espacio libre.

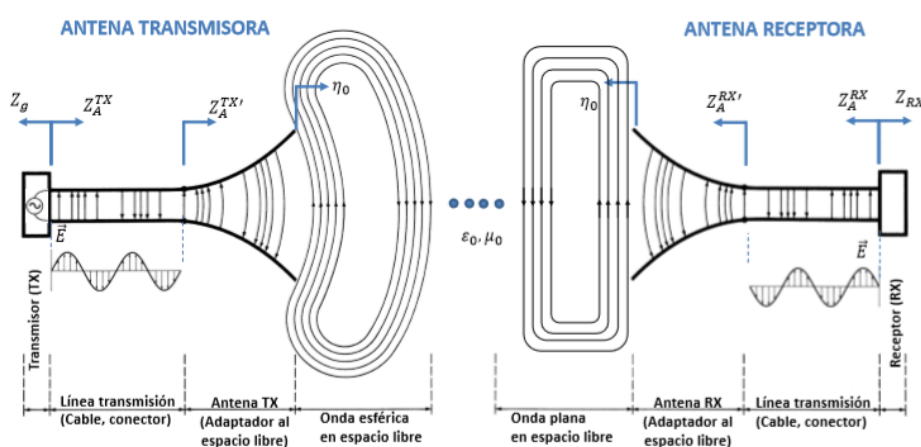


Figura 1. Esquema de un sistema de transmisión y recepción

Dicha onda electromagnética, como su propio nombre indica, está compuesta por un campo eléctrico (E) y un campo magnético (H).

Para poder caracterizar una onda se precisa básicamente de dos parámetros: frecuencia (f) y longitud de onda (λ) que quedan definida por la siguiente relación:

$$\lambda = c/f \quad (2.1)$$

dónde c se considera la velocidad de propagación de la onda en el medio, en el caso de propagación en el espacio libre la velocidad de propagación de la onda en el vacío (aproximado a la velocidad de la luz $3 \cdot 10^8$ m/s).

Existen un conjunto de parámetros básicos (2.2.1) que caracterizan a las antenas como son, por ejemplo, el ancho de banda, la directividad, la eficiencia o los parámetros S.

De estos factores se derivan los diferentes tipos de antenas (2.1.3) las cuales serán aplicadas a diferentes áreas según sus prestaciones.

2.1.2 Parámetros básicos

2.1.2.1 Diagramas de radiación

El diagrama de radiación de una antena se puede definir como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en un determinado espacio de coordenadas, principalmente representado en coordenadas cilíndricas o esféricas. En la mayoría de los casos, este diagrama está determinado por la región de campo lejano (figura 2).

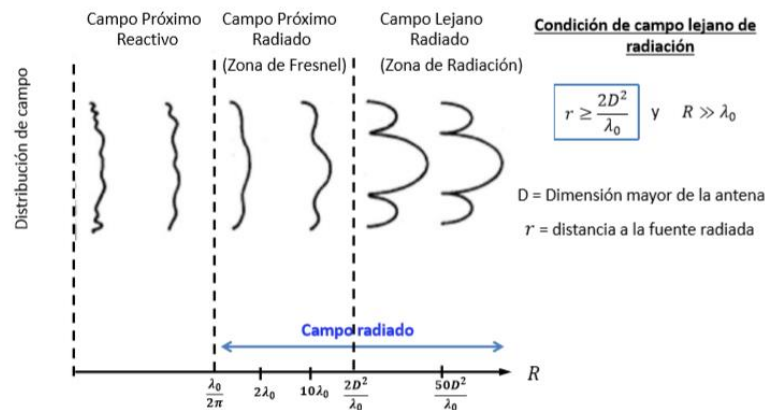


Figura 2. Distribución del campo radiado

A continuación, se mencionan los principales diagramas de radiación y algunos usos frecuentes de utilización.

Un diagrama de radiación isotrópico se define como el diagrama de radiación hipotético que tendría una antena si fuese capaz de radiar por igual en todas las direcciones, lo que requiere que la antena no tenga pérdidas y por lo tanto sea físicamente irrealizable. Este tipo de diagrama se utiliza principalmente como referencia para medir la directividad de las antenas.

Se refiere a un diagrama de radiación directivo cuando este es significativamente más pronunciado en una dirección que en las demás. Es propio de las antenas de apertura (2.1.3.3). Un servicio típico propio de este diagrama son las comunicaciones punto a punto.

Cuando se tiene un diagrama que no es direccional en un plano y direccional en todos los planos ortogonales restantes, se define como diagrama omnidireccional. Es propio de las antenas lineales (2.1.3.1). Un servicio típico propio de este diagrama son las antenas bases de telefonía móvil.



Figura 3. Diagramas de radiación típicos

2.1.2.2 Directividad y Ganancia

La directividad de una antena se define como la proporción de intensidad de radiación en una dirección dada y la intensidad de radiación media en todas las direcciones.

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (2.2)$$

donde U es la intensidad de radiación y P_{rad} la potencia radiada.

La directividad máxima quedaría definida por la siguiente fórmula:

$$D_{max} = 4\pi \frac{U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.3)$$

donde U_{max} es la intensidad de radiación máxima.

La ganancia de una antena se puede definir de manera semejante a la de directividad. No obstante, aquí se compara la intensidad de radiación y la potencia entregada a la antena.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{ent}} \quad (2.4)$$

donde P_{ent} es la potencia entregada a la antena.

Ganancia y directividad están estrechamente relacionadas. Sin embargo, con el parámetro de la ganancia se tiene en cuenta la eficiencia de la antena. ([2.1.2.3](#))

2.1.2.3 Eficiencia

En esta sección se va a diferenciar entre la eficiencia de radiación y la eficiencia de la antena.

Eficiencia de radiación: se trata de una medida de las pérdidas totales en los terminales de entrada y la estructura de la antena. En términos de potencia se puede expresar como el cociente entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la antena justo antes de ser radiada.

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{ent}} \quad (2.5)$$

donde P_{rad} es la potencia radiada y P_{en} es la potencia antes de ser radiada.

Normalmente se suele mostrar de manera porcentual y suelen ser valores próximos al 100%.

Eficiencia de antena: generalmente se tiene en cuenta las pérdidas por fenómenos de reflexión de la señal, problemas de conducción y pérdidas propias del dieléctrico.

La eficiencia total de la antena tiene en cuenta todos estos fenómenos y en términos de potencia puede entenderse como el cociente entre la potencia generada por el sistema de alimentación de la antena y la potencia que finalmente es capaz de radiar.

$$\eta_{tot} = \frac{P_{rad}}{P_{dg}} \quad (2.6)$$

donde P_{dg} es la potencia que se encuentra disponible en el generador que alimenta a la antena.

2.1.2.4 Parámetros S

Para el desarrollo del concepto de los parámetros S, conviene considerar a la antena como una red con un puerto de entrada y un puerto de salida (cuadripolo).

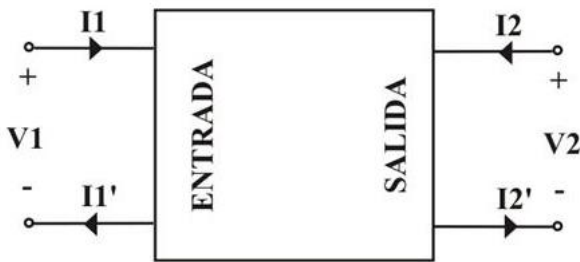


Figura 4. Esquema de un cuadripolo

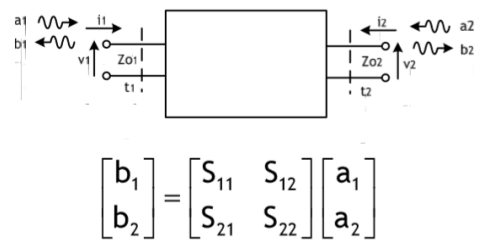


Figura 5. Esquema de un cuadripolo con ondas incidentes y reflejadas y matriz de parámetros S

Los parámetros S (también conocidos como de dispersión o de Scattering) relacionan la cantidad de potencia que se transmite a cada puerto en condiciones de que se produzca una onda incidente en dicho puerto.

Como podemos ver en la figura 5, a la onda incidente se la suele denotar por a_i y a la onda reflejada por b_i , mientras que la impedancia característica de cada puerto por Z_{0i} siendo esta la relación entre la tensión (v_i) y la corriente (i_i) presente en los bornes de cada puerto.

Si se desarrolla la ecuación presente en la figura 5 se obtiene que :

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

De manera genérica para una red con n puertos el cálculo de los parámetros S se obtiene de la siguiente manera:

$$S_{ji} = \left. \frac{b_j}{a_i} \right|_{a_k = 0 \quad k \neq i} \quad (2.8)$$

Para el cálculo de los parámetros S en un puerto determinado, se debe conseguir que no existan ondas incidentes en el resto de los puertos de la red. Para ello es necesario cargar los puertos con su impedancia de referneicia Z_{0i} .

Este procedimiento es el que se realizará a la hora de efectuar las medidas de las antenas, colocando cargas en los puertos de 50Ω .

En la tabla siguiente se muestra el significado físico de los parámetros S para un cuadripolo:

| Parámetro | Coficiente | Descripción | Fórmula |
|-----------|--------------------------------|---|---|
| S_{11} | Reflexión a la entrada | Cantidad de potencia reflejada en el puerto 1 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto. | $S_{11} = \left(\frac{b_1}{a_1} \right)_{a_2=0}$ |
| S_{12} | Transmisión o ganancia inversa | Cantidad de potencia que llega al puerto 1 alimentando la red por el puerto 2. | $S_{12} = \left(\frac{b_1}{a_2} \right)_{a_1=0}$ |
| S_{21} | Transmisión o ganancia directa | Cantidad de potencia que llega al puerto 2 cuando se alimenta la red por dicho puerto. | $S_{21} = \left(\frac{b_2}{a_1} \right)_{a_2=0}$ |
| S_{22} | Reflexión a la salida | Cantidad de potencia que se refleja en el puerto 2 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto. | $S_{22} = \left(\frac{b_2}{a_2} \right)_{a_1=0}$ |

Tabla 1. Significado físico de los parámetros S

2.1.2.5 Impedancia de entrada y adaptación de impedancias

El conjunto de generador, línea de transmisión y antena se puede estudiar desde el punto de vista circuital para tratar con mayor sencillez temas como la impedancia de entrada y la adaptación de impedancias

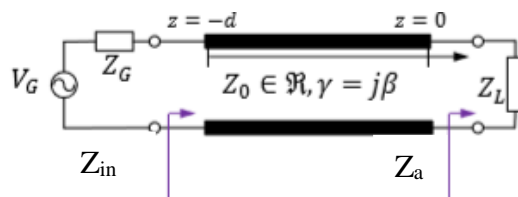


Figura 6. Esquema de línea de transmisión con generador y carga

De manera general, una impedancia ($Z_a(\omega)$) está formada por una parte real ($R_a(\omega)$) y una parte imaginaria ($X_a(\omega)$). La impedancia de entrada de una antena es la relación entre el

voltaje y la intensidad presentes en los bornes de la misma. Por lo general, se diseña la antena de manera que se consiga anular la parte imaginaria de la impedancia. Si se produce esta característica, dicha antena se denomina antena resonante.

$$Z_a = R_a(\omega) + jX_a(\omega) \quad (2.9)$$

La parte real de la resistencia, $R_a(\omega)$, es posible separarla en resistencia de pérdidas y otra de radiación:

$$R_a(\omega) = R_r + R_l \quad (2.10)$$

donde R_r es la resistencia de radiación y R_l es la resistencia de pérdidas óhmicas.

De aquí se pueden derivar la potencia que se le entrega a la antena, siendo la suma de la potencia radiada y la potencia de pérdidas propias de la antena.

$$P_{en} = P_r + P_l \quad (2.11)$$

$$P_r = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_r \quad (2.12)$$

$$P_l = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_l \quad (2.13)$$

donde P_r es la potencia radiada, P_l es la potencia de pérdidas de la antena e I_0 es la corriente de entrada de la antena.

De la *figura 6* podemos observar como una antena estará conectada a un generador, que será quien dote de energía a la antena, por medio de una línea de transmisión.

En términos de impedancia, la línea de transmisión viene caracterizada por su impedancia característica Z_0 , el generador por Z_g y la impedancia de la antena por Z_a (2.9) y la impedancia vista desde el generador Z_{in}

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (2.14)$$

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.15)$$

Como se puede observar en la tabla (*Tabla 1*) el parámetro S_{11} también denominado coeficiente de reflexión (Γ), proporciona información de la transferencia de energía entre el generador y la antena al relacionar la onda reflejada y la onda incidente.

En términos de impedancia el coeficiente de reflexión puede verse como:

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2.16)$$

La potencia de entrada se puede definir mediante la siguiente fórmula:

$$P_{in} = \frac{1}{2} |I|^2 R_{in} = \frac{1}{2} \left| \frac{V_g}{Z_g + Z_{in}} \right|^2 R_{in} \quad (2.17)$$

donde I es la corriente del generador y V_g el voltaje del mismo

A partir de esta fórmula se puede derivar que la máxima transferencia de potencia se producirá cuando $Z_g = Z_{in}^*$ lo que implica que $R_g = R_{in}$ y $X_g = -X_{in}$.

De este modo la situación de máxima transferencia de potencia quedaría definida por:

$$P_{in} = \frac{1}{8} \frac{|V_g|^2}{R_g} \quad (2.18)$$

2.1.2.6 Ancho de banda

Se conoce ancho de banda como el rango de frecuencias entre los cuales el funcionamiento de la antena, respecto a unas ciertas características, cumple un determinado estándar. Este ancho de banda se puede expresar de manera porcentual:

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} * 100 \quad (2.19)$$

donde f_{max} corresponde a la frecuencia máxima en que se cumplen las especificaciones de un determinado sistema definido por su estándar y f_{min} la frecuencia mínima.

2.1.2.7 banda de frecuencias

A continuación, se muestra una tabla de la división del espectro radioeléctrico, con la banda de frecuencias, la longitud de onda y las aplicaciones asociadas:

| Banda | Frecuencia | Longitud onda | Denominación | Aplicaciones |
|-------|--------------|---------------|--------------------------|---|
| ELF | < 3 KHz | > 100 km | Extremely Low Frequency | |
| VLF | 3 – 30 KHz | 100 – 10 km | Very Low Frequency | Navegación, Sonar |
| LF | 30 – 300 KHz | 10 – 1 km | Low Frequency | Radio balizas, ayudas navegación |
| MF | 0.3 – 3 MHz | 1000 – 100 m | Medium Frequency | AM radiodifusión, radio marítima, guarda costas |
| HF | 3 – 30 MHz | 100 – 10 m | High Frequency | Teléfono, telegrafía, radioaficionados |
| VHF | 30 – 300 MHz | 10 – 1 m | Very High Frequency | TV, FM radiodifusión, control aéreo |
| UHF | 0.3 – 3 GHz | 100 – 10 cm | Ultra High Frequency | TV, celular(UMTS, GSM), radar, GPS |
| SHF | 3 – 30 GHz | 10 – 1 cm | Super High Frequency | WLAN, radioenlaces, radar aéreo, com.s satélite (DBS) |
| EHF | 30 – 300 GHz | 10 – 1 mm | Extremely High Frequency | Radar militar, com.s inalámbricas de banda ancha, sistemas de guiado autónomo vehículos |

Tabla 2. División del espectro electromagnético

La banda de frecuencias en la que trabajan las antenas diseñadas en el presente TFG se sitúa en la banda de microondas (1-300 GHz). En la tabla de abajo se puede observar a su vez una subdivisión de la banda de microondas:

| Banda | Frecuencia | Longitud onda |
|-------|---------------|----------------|
| L | 1 - 2 GHz | 30 – 15 cm |
| S | 2 - 4 GHz | 15 – 7.5 cm |
| C | 4 – 8 GHz | 7.5 – 3.75 cm |
| X | 8 – 12.4 GHz | 3.75 – 2.42 cm |
| Ku | 12.4 – 18 GHz | 2.42 – 1.66 cm |
| K | 18 – 26.5 GHz | 1.66 – 1.11 cm |
| Ka | 26.5 – 40 GHz | 11.1 – 7.5 mm |
| mm | 40 – 300 GHz | 7.5 – 1 mm |

Tabla 3. División de la banda frecuencial de las microondas

2.1.3 Tipos de antenas

En esta sección se presentarán los principales tipos de antenas y algunas de sus características.

2.1.3.1 Antenas lineales

Son aquellas que están construidas mediante hilos conductores que son extremadamente delgados; su radio es mucho menor que su longitud onda.

Algunos ejemplos de estas antenas son los monopolos y los dipolos.



Figura 7. Dipolo



Figura 8. Monopolo

Suelen ser utilizadas para la radiodifusión, modems Wi-Fi y para la difusión de Televisión Digital Terrestre (TDT).

2.1.3.2 Antenas impresas

Son antenas implementadas sobre tecnología de circuito impreso. Suelen ser de banda estrecha, bajo coste y tienen limitaciones de potencia.

Poseen una gran facilidad para la integración con otros sistemas como pueden ser los teléfonos móviles o los ordenadores.

Las antenas de parche son las antenas típicas con diferentes formas como puede ser la cuadrada, rectangular o el caso de este TFG la circular.

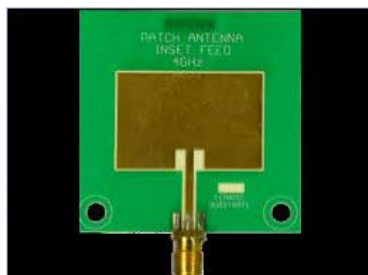


Figura 9. Antena impresa rectangular

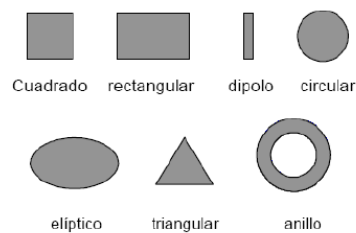


Figura 10. Tipos frecuentes de formas de antenas de parche

La utilización típica de estas antenas son la telefonía móvil, comunicaciones vía satelital y el radar.

2.1.3.3 Antenas de apertura

La radiación de estas antenas sale al exterior a través de una embocadura. Presentan una alta ganancia y un gran ancho de banda.

Son antenas de apertura las bocinas, los reflectors y las ranuras.

Comunicaciones por satélite y comunicaciones punto a punto son los servicios típicos que se prestan con este tipo de antenas.



Figura 11. Antena reflectora



Figura 12. Antena de bocina

2.1.3.4 Agrupación de antenas

Se trata de una asociación (arrays) de antenas simples como las especificadas en las secciones anteriores. Estas agrupaciones se desarrollan a partir de un elemento unitario. Permiten obtener una mayor ganancia y un mayor control del diagrama de radiación para favorecer el apuntamiento.

Estos arrays de antenas se pueden subdividir a su vez según el tipo de alimentación que tengan, la disposición espacial y según el desfase que tengan los elementos unitarios entre

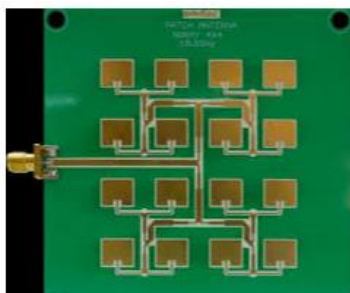


Figura 14. Array de antenas de parche



Figura 13. Array de antenas de bocina

Existen otro tipo de agrupaciones como son las “antenas inteligentes” en las que podemos considerar a las antenas MIMO, presentadas en este TFG, y que su teoría será desarrollada más adelante.

2.2 Tecnología Microstrip ^[6]

Dado que el TFG desarrollado se ha realizado sobre la tecnología microstrip, es debido dedicar una sección a esta tecnología.

2.2.1 Introducción

En las últimas tres décadas la antena de patch con tecnología microstrip (MPA) se ha convertido en una antena sofisticada y versátil.

Debido a su bajo coste, facilidad de fabricación y alta compatibilidad con la tecnología de circuitos integrados se ha conseguido un gran abanico de aplicaciones tanto en el ámbito comercial como en el militar.

2.2.2 Fundamentos de la tecnología microstrip

En la imagen inferior (figura 16), podemos observar la composición típica de una estructura microstrip y una antena de parche sobre tecnología microstrip (figura 15).

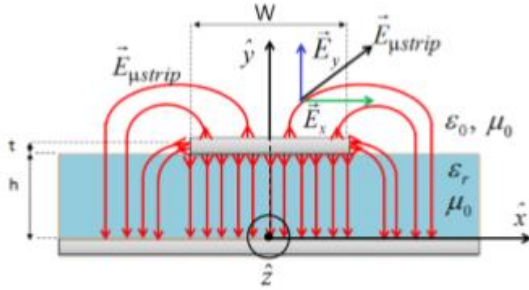


Figura 16. Estructura Microstrip

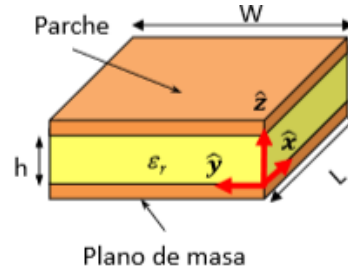


Figura 15. Antena de parche sobre tecnología Microstrip

En la siguiente tabla se puede observar el significado de cada parámetro:

| Parámetro | Definición |
|--------------|---------------------------------------|
| W | Ancho del patch |
| L | Longitud del patch |
| t | Espesor del metal |
| h | Espesor del dieléctrico |
| ϵ_0 | Constante eléctrica en el vacío |
| μ_0 | Constante magnética en el vacío |
| ϵ_r | Constante eléctrica en el dieléctrico |

Tabla 4. Parámetros de parche microstrip

Como podemos observar en la figura 16, esta tecnología presenta una estructura que no está confinada, es decir, el sustrato no envuelve por completo la zona metalizada.

Esta característica es fundamental a la hora de analizar el comportamiento de la antena ya que existen tanto la constante dieléctrica del aire (vacío) como la constante eléctrica propia del sustrato.

Denominaremos a la constante dieléctrica de un medio homogéneo que envuelva completamente a la línea microstrip y que será una combinación entre la constante dieléctrica del aire y la del dieléctrico como constante dieléctrica efectiva (ϵ_{refec}).

Dicha constante eléctrica efectiva tendrá un valor entre 1 y ϵ_r .

$$1 < \epsilon_{refec} < \epsilon_r \quad (2.20)$$

La forma de calcular esta ϵ_{refec} viene dada por las siguientes ecuaciones.

$$\epsilon_{refec} = \begin{cases} \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left[\left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} + 0.04 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right]; & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5}; & \frac{W}{h} > 1 \end{cases} \quad (2.21)$$

2.2.3 Formas de alimentación

2.2.3.1 Alimentación por sonda coaxial

Es el método más habitual de alimentación. Habitualmente suele tener una impedancia de entrada característica de 50Ω , aunque dicha impedancia varía según la posición del alimentador.

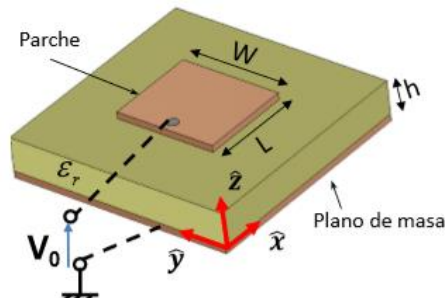


Figura 17. Parche alimentado por sonda coaxial

2.2.3.2 Alimentación por línea microstrip

Un parche microstrip puede conectarse directamente a una línea de alimentación microstrip (figura 19). En el borde del patch, en general la impedancia suele ser mayor de 50Ω , por lo que se requiere, tal y como se ha hecho en este TFG, un elemento denominado taper para evitar desadaptación de impedancias.

Otra forma de adaptar la línea de alimentación, es introducir la línea dentro del parche (figura 18) ya que en el interior del parche se obtienen impedancias mas bajas.

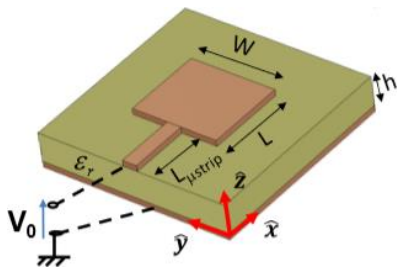


Figura 19. Parche con alimentación microstrip

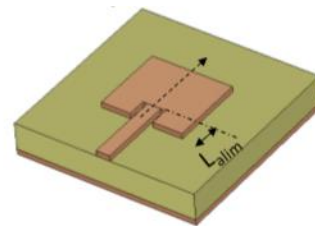


Figura 18. Parche con alimentación microstrip introducida en el parche

2.2.4 Ventajas e inconvenientes de la tecnología microstrip

En esta sección se van a enumerar las ventajas y las desventajas que tiene la tecnología microstrip en relación con otras tecnologías:

Ventajas

- Bajo perfil
- Puede ser producida por tecnología de circuitos impresos
- Se puede integrar fácilmente con elementos circuitales
- Puede ser diseñada para servicios de polarización dual
- Puede ser diseñada para servicios multifrecuenciales

Desventajas

- Debido a su pequeña separación entre el patch radiante y el plano de masa, la antena microstrip no puede manipular un gran voltaje.
- Los arrays de antenas microstrip generalmente tienen mayores pérdidas óhmicas que otro tipo de arrays.

2.3 Tecnología UWB ^{[4][6][7]}

2.3.1 Introducción

A lo largo de las pasadas décadas, las antenas UWB han atraído el interés de la comunidad científica gracias a su gran variedad de aplicaciones tales como radar, redes de sensores inalámbricos y body área networks, por ejemplo.

El final de la Guerra Fría permitió que sistemas que estaban exclusivamente destinados al ámbito militar pudiesen comenzar a aplicarse al entorno comercial.

El concepto de sistemas UWB aparece en el año 1989 al referirse a determinados términos como: señales de impulso y señales con un gran ancho de banda relativo.

En el año 2002, la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) especificó diferentes estándares y restricciones operativas para tres tipos de sistemas UWB y estableció el rango de frecuencias desde 3.1 hasta 10.6 GHz. También definió que para que un sistema se pueda considerar UWB debe de tener un ancho de banda mayor de 500 MHz y que debe cumplir con una emisión de densidad espectral de potencia máxima de -41.25 dBm/MHz.

2.3.2 Características de la tecnología UWB

Existen dos diferencias principales entre los sistemas UWB y los denominados sistemas de banda ancha y banda estrecha.

La primera, más evidente, es que ocupan un mayor ancho de banda que las tecnologías mencionadas anteriormente. La segunda diferencia es que estos sistemas UWB transmiten pulsos en lugar de señales sinusoidales.

Aunque la diferencia principal entre UWB y resto de tecnologías, es que este sistema está diseñado para ocupar bandas de frecuencias que ya están asignadas a otros servicios sin causar una gran interferencia entre estos gracias al límite de densidad espectral de potencia tan bajo que estandarizó la FCC.

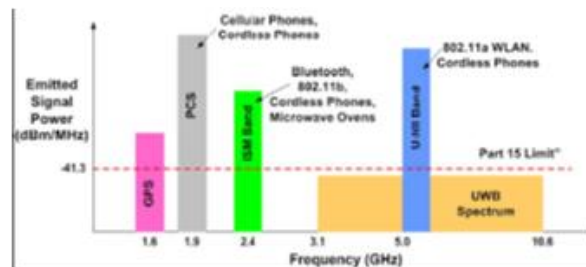


Figura 20. Comparativa entre el ancho de banda ocupado y la densidad espectral de potencia de diferentes sistemas de comunicación

Lo que estableció la FCC en 2002 es que se consideraría un sistema como UWB si cumple una de las dos condiciones mostradas a continuación:

$$BW > 500 \text{ MHz} \quad (2.22)$$

$$Bf \geq 0.2 \quad (2.23)$$

B_f se define como ancho de banda fraccionado según la ecuación siguiente:

$$Bf = \frac{f_{max} - f_{min}}{(f_{max} + f_{min})/2} \quad (2.24)$$

donde f_{max} corresponde a la frecuencia máxima en que se cumplen las especificaciones de un determinado sistema definido por su estándar y f_{min} la frecuencia mínima.

Esta condición hace referencia a que el ancho de banda fraccionado entre puntos a 10 dB ha de ser mayor o igual que el 20%.

2.3.3 Ventajas y desventajas de la tecnología UWB

Una ventaja evidente que ya se ha mencionado es la de que puede coexistir con un gran número de sistemas de comunicaciones sin apenas interferir, debido a las restricciones de la FCC.

A causa de estas restricciones, los sistemas UWB quedan inutilizados para aplicaciones de largo alcance, aunque esto no supone un mayor problema debido a que fue concebido para comunicaciones de corto alcance como puede ser dar servicios a entornos tales como oficinas, hogares... En estos entornos se presenta el problema de propagación multi-camino y la difícil visión directa entre emisor y receptor.

Gracias a la baja potencia de emisión y la resistencia a las interferencias, hacen que estos sistemas sean difícilmente detectables y por tanto de interesante utilización en el entorno militar.

Según el teorema de Shannon-Harley que generaliza el teorema de Nyquist, establece que la capacidad de un canal es proporcional al ancho de banda. Por lo tanto, los sistemas UWB alcanzarán grandes capacidades en distancias muy cortas, como se puede observar en la figura inferior.

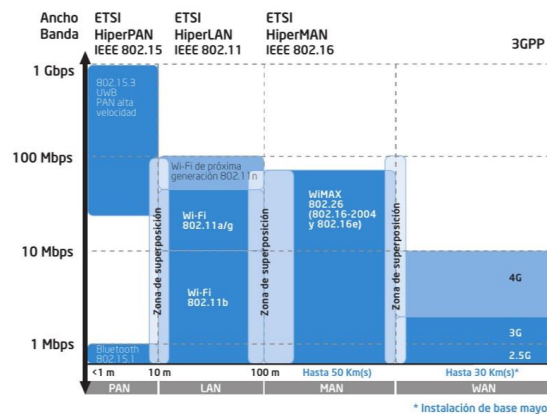


Figura 21. Comparativa entre la velocidad de transferencia de datos y la distancia que pueden alcanzar diferentes tipos de sistemas de comunicación

Los sistemas UWB requieren que la antena sea capaz de recibir todos los componentes espectrales de la señal de manera eficiente y sin introducir una distorsión significativa en la fase de los componentes, debido de nuevo a la baja potencia de señal.

Al tener una banda de trabajo tan grande se requiere que dentro de esa banda su funcionamiento sea consistente y predecible.

Abajo se resumen algunas ventajas y desventajas de los sistemas UWB.

Ventajas

- Coexistencia con un gran número de servicios de telecomunicaciones
- Baja interferencia
- Difícilmente detectables
- Gran capacidad de transferencia de datos
- Bajo coste al poder utilizar

Desventajas

- Corto alcance
- Difícil visión directa entre emisor y receptor en redes WAN
- Requiere un funcionamiento consistente en toda la banda

2.4 Filtros notch ^[4]

2.4.1 Compatibilidad con otros sistemas de comunicaciones

Dado el gran ancho de banda que ocupa el sistema UWB, debe coexistir con numerosos sistemas. Destacamos los siguientes sistemas como principales causas conflictos con el sistema UWB:

- WiMAX: que comprende el rango de frecuencia de 3.3-3.7 GHz
- WIFI: en concreto los estándares IEE 802.11a, IEE 802.11n e IEEE 802.11ac que son los sistemas WIFI cuya frecuencia de trabajo es de 5.1-5.8 GHz. Se trata del sistema que mayor interferencia puede causar, principalmente por dos cuestiones: es un sistema muy implantado en la actualidad y pertenece al igual que UWB a las redes WPAN (Wireless Personal Area Network), una red para la comunicación entre distintos dispositivos como por ejemplo entre ordenadores e impresoras.
- Banda X: Aunque la tabla (*Tabla 3*) indica que la banda X comprende de 8 a 12.4 GHz, algunos servicios como la banda X para comunicación satelital, trabajan en frecuencias comprendidas entre los 7 y 8 GHz. Es en este rango de frecuencias donde se diseñará un filtro notch para eliminarla.

2.4.2 Tipos de filtros notch

Como se ha visto en la sección anterior, existen varios sistemas que pueden causar interferencia y que a su vez pueden ser interferidos, por los sistemas UWB.

Aunque, debido a la restricción de potencia de la FCC y el gran ancho de banda que ocupa, podemos decir que se trata de un sistema que causa pocas interferencias.

Sin embargo, es deseable reducir estas interferencias al mínimo posible mediante la implantación de filtros de rechazo de banda o filtros notch tal y como se ha planteado en este TFG.

Este tipo de filtros consisten en una estructura con una longitud determinada (normalmente $\lambda/2$ o $\lambda/4$) que resuena a la frecuencia deseada a la que se ha diseñado según la longitud, provocando así una interferencia destructiva evitando que en esa banda de frecuencias específica no se cumpla el requisito de la banda del sistema.

Podemos destacar cuatro tipos fundamentales de filtros:

- Internos al parche: Se realizan slots en el parche (*figura 23*)
- Externos al parche: Formados por pistas metálicas próximas al parche o a la línea de alimentación (*figura 22*)
- Plano de masa: Se provocan slots en el plano de masa del elemento (*figura 25*)
- Línea de alimentación: Se insertan slots en la línea de alimentación (*figura 26*)

Estos filtros son casi ilimitados en cuanto a forma se refiere. En este TFG se realizarán los filtros en forma de U (U-shaped).

La longitud de estos filtros viene definida por la ecuación de un monopolo $\lambda/2$:

$$L = \frac{c}{2f_{res}\sqrt{\epsilon_{refec}}} \quad (2.25)$$

donde L es la longitud, c es la velocidad de la luz en el vacío, f_{res} es la frecuencia de resonancia y ϵ_{refec} es la constante dieléctrica efectiva.

ϵ_{refec} se puede aproximar como la suma de la constante dieléctrica del sustrato y la constante dieléctrica del aire dividida por dos:

$$\epsilon_{refec} = \frac{\epsilon_r + \epsilon_0}{2} \quad (2.26)$$

donde ϵ_r es la constante dieléctrica del sustrato y ϵ_0 es la constante dieléctrica del vacío (aire) y es igual a la unidad.

No obstante, si observamos la *figura 31*, una parte del filtro de la zona 2 está situado en la cara posterior donde existe plano de masa

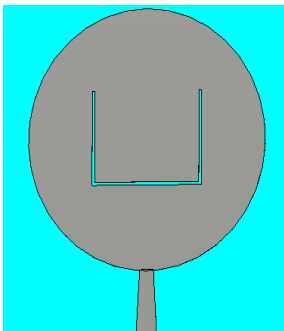


Figura 23. Filtro interno al parche

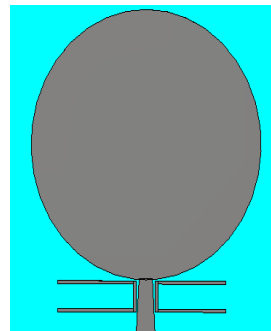


Figura 22. Filtro externo al parche

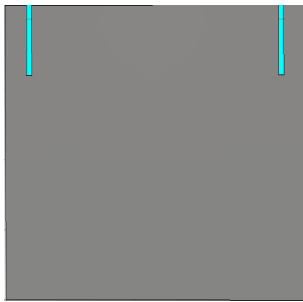


Figura 25. Filtro en plano de masa

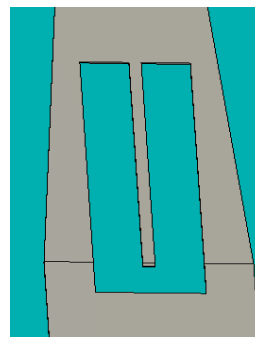


Figura 24. Filtro en línea de alimentación

2.5 Tecnología MIMO [8]

2.5.1 Introducción

Hoy en día las redes de área inalámbrica local (WLAN) están muy extendidas en todo el mundo debido principalmente a su bajo coste y a que permiten proporcionar servicio en un rango de distancia apto para el uso en los domicilios, empresas, lugares públicos...

No obstante, esta tecnología es bastante limitada en cuanto a tasa de transferencia de datos si las comparamos con las redes cableadas.

Debido a este inconveniente surge la tecnología MIMO; con la intención de ofrecer mayores tasas de transferencia de datos, aumentar la distancia de cobertura existente con las WLAN sin aumentar el ancho de banda requerido.

Las redes WLAN no son el único ámbito donde se puede introducir la tecnología MIMO; en otros sistemas como la telefonía móvil o WiMax también es aplicable esta tecnología.

2.5.2 Concepto de MIMO

Podemos definir MIMO como una tecnología que utiliza múltiples señales que se transmiten/reciben de manera simultánea por un mismo canal, aprovechando la propagación multicamino incrementando así la eficiencia espectral del sistema de comunicaciones inalámbrico gracias a un uso diverso de las antenas y complejos algoritmos de tratamiento digital de la señal tanto en el transmisor como en el receptor.

El punto de interés entre otras muchas características es que, a diferencia de los demás sistemas de comunicación, MIMO aprovecha la propagación multicamino a su favor obteniendo a sí un gran número de ventajas que serán comentadas a continuación.

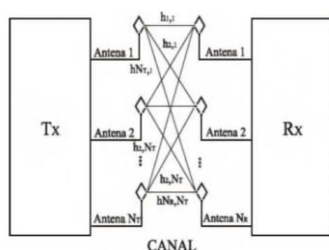


Figura 27. Esquema de un sistema MIMO



Figura 26. Modem con antenas MIMO

2.5.3 Ventajas de la tecnología MIMO

A continuación, se puede observar algunas de las ventajas que presenta la tecnología MIMO:

- Tasa de bits: Dada la transmisión simultánea de múltiples tramas de datos se multiplica la tasa de transmisión sin consumir más espectro de frecuencia.
- Eficiencia espectral: MIMO es un sistema que mejora la eficiencia espectral multiplicando el doble de bits por herzio.
- Número de usuarios: Si se incrementa la capacidad, como es el caso, se puede aumentar el número de usuarios que se pueden conectar de manera simultánea.
- Cobertura: Con la tecnología MIMO, se aumenta el rango de cobertura respecto al resto de los sistemas de comunicación inalámbricos.
- Fiabilidad: La probabilidad de error es más baja si se utiliza tecnología MIMO.
- Coste: Debido a todos estos aspectos como el aumento del ancho de banda, la cobertura y el mayor número de usuarios, el coste de la red se abarata.

3 Criterios de diseño y flujo de trabajo

3.1 Sustrato utilizado

En este TFG se ha utilizado el sustrato FR-35 con $\epsilon_r=3.5$, $H=1.524$ mm y una tangente de pérdidas $\tan\delta=0.005$.

La altura de las pistas de PEC (Perfect Electric Conductor) tienen una altura de 0.03 mm.

3.2 Criterios de diseño

En el presente TFG se han diseñado y construido tres tipos de antenas en cuanto al número de elementos se refiere: elemento unitario, MIMO de dos elementos y MIMO de cuatro elementos.

Estas antenas han sido diseñadas con filtros notch en las siguientes frecuencias:

- Zona 1: 3.3-3.7 GHz
- Zona 2: 5.0-5.3 & 5.5-6.0 GHz
- Zona 3: 7-8 GHz

Para la zona 2 se ha propuesto un filtro paso banda (Dual Band Pass Filter). Este filtro permite que exista una zona frecuencial con $S_{11} \leq -10$ dB entre dos zonas de rechazo de bandas.

Si acudimos a la *figura 33* podemos observar como un “brazo” del filtro externo al parche está situado en la cara contraria al plano de masa y el otro se sitúa en una zona en la que no influye el plano de masa. Es por esto por lo que se tienen dos ϵ_{refec} diferentes y por tanto dos longitudes efectivas también distintas que afectarán a frecuencias diversas.

Al tratarse de antenas UWB se considera que se debe cumplir estrictamente el ancho de banda propio de este sistema de (3.1-10.6 GHz). No obstante, el criterio que se ha establecido en este TFG es el aumentar el ancho de banda de 3.1-20 GHz para que estas antenas puedan coexistir con un mayor número de sistemas.

Los criterios que se han utilizado en este TFG en relación a los parámetros S para cada elemento son:

- Elemento unitario sin filtros: $S_{11} \leq -10$ dB
- Elemento unitario con filtros:
 - $S_{11} \geq -10$ dB en zona 1,2 y 3
 - $S_{11} \leq -10$ dB en el resto de las frecuencias
- MIMO dos elementos con filtros:

- $S_{11} \geq -10$ dB en zona 1,2 y 3
- $S_{11} \leq -10$ dB en el resto de las frecuencias
- $S_{12} \leq -20$ dB

- MIMO cuatro elementos con filtros notch:
 - $S_{11} \geq -10$ dB en zona 1,2 y 3
 - $S_{11} \leq -10$ dB en el resto de las frecuencias
 - $S_{21} \leq -15$ dB
 - $S_{31} \leq -15$ dB
 - $S_{41} \leq -15$ dB

Nótese que las antenas MIMO dos elementos y MIMO cuatro elementos al estar formadas a partir del elemento unitario se obtiene que:

- $S_{11}=S_{22}=S_{33}=S_{44}$
- $S_{21}=S_{12}=S_{43}=S_{34}$
- $S_{31}=S_{13}=S_{42}=S_{24}$
- $S_{41}=S_{14}=S_{32}=S_{23}$

Debido a esto, las simulaciones se realizarán solo para un puerto con el objetivo de ahorrar tiempo computacional.

Sin embargo, como se verá más adelante, debido a las imperfecciones a la hora de la construcción no existirán dos elementos iguales y por tanto no se cumplen las relaciones anteriores.

3.3 Flujo de trabajo

En la siguiente representación se describe el procedimiento que se ha seguido para diseñar los elementos.

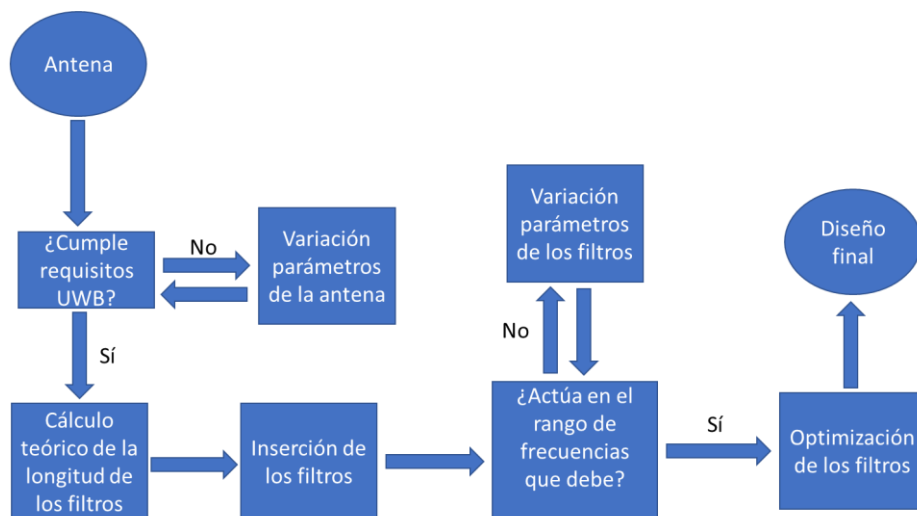


Figura 28. Diagrama de flujo antenas con filtros

Si se trata de una antena MIMO la que se diseña se añade una etapa más en el proceso que es la de mejora de los parámetros de aislamiento: S_{nm} .

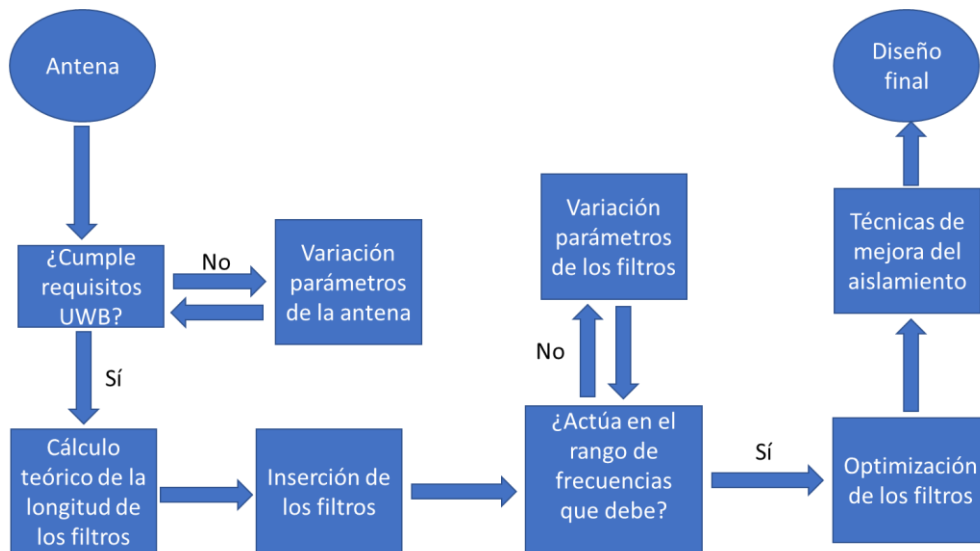


Figura 29. Diagrama de flujo antenas MIMO con filtros

4 Diseño

En este capítulo se mostrarán los resultados simulados mediante el programa CST (Computer Simulation Technology), para el elemento unitario sin filtros, el elemento unitario con filtros notch, antena MIMO de dos elementos con filtros notch y antena MIMO de cuatro elementos con filtros notch.

Todos los resultados de los parámetros S están normalizados a 50Ω .

En cada apartado se incluye una representación de la antena con las medidas*, una tabla con el nombre, valor y definición de cada medida significativa de la antena y las gráficas correspondientes con los parámetros S.

Las representaciones de las antenas incluyen en la misma figura tanto la parte delantera de como la parte posterior.

*Al estar basadas las antenas en el elemento unitario, no se incluyen las medidas que ya se hayan mostrado con anterioridad.

4.1 Elemento unitario sin filtros

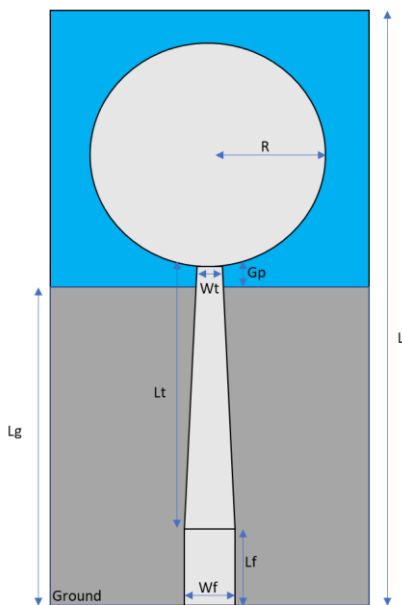


Figura 30. Representación del elemento unitario

| Parámetro | Medida (mm) | Definición |
|-----------|-------------|---|
| W | 35 | Ancho del sustrato |
| L | 49 | Longitud del sustrato |
| R | 13 | Radio del patch |
| Wf | 3.4 | Ancho de la línea de alimentación |
| Lf | 6 | Longitud de la línea de alimentación |
| Lt | 16 | Longitud del taper |
| Wt | 1.5 | Ancho del taper |
| Gp | 1 | Distancia entre el patch y el plano de masa |
| Lg | 21 | Longitud del plano de masa |

Tabla 5. Parámetros del elemento unitario sin filtros

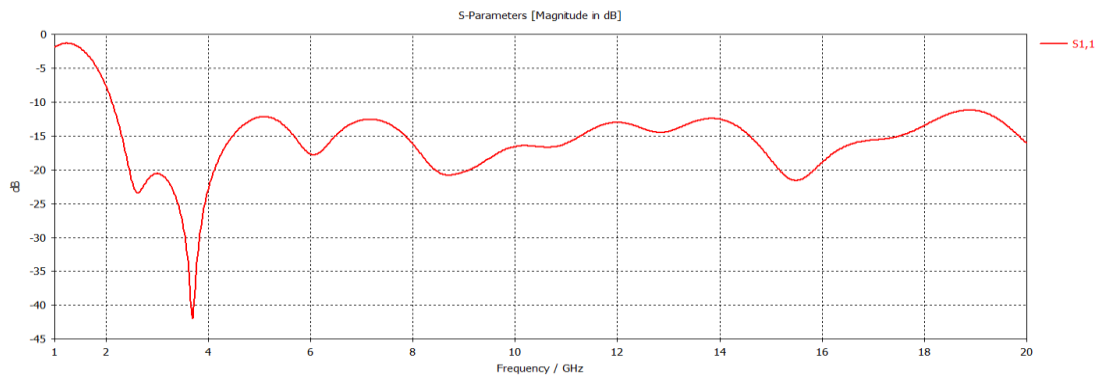


Figura 31. Parámetro S_{11} del elemento unitario sin filtros

El ancho de la línea de alimentación, W_f , tiene el valor de 3.4mm debido que es el equivalente a 50Ω (de manera aproximada).

Como se puede observar en la figura 33, el parámetro S_{11} cumple con el requisito establecido en los criterios de diseño.

La línea de alimentación no es constante en su anchura; al llegar al patch se reduce su ancho. A este tipo de línea de alimentación se le denomina taper y se comentará el motivo de uso y el efecto del mismo en el Anexo-A.

4.2 Elemento unitario con filtros notch

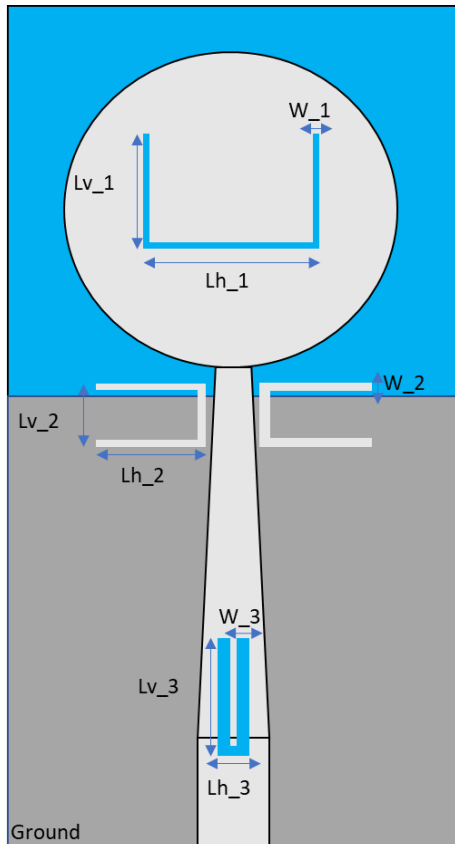


Figura 32. Representación del elemento unitario con filtros notch

| Parámetro | Medida (mm) | Definición |
|-----------|-------------|---------------------------------------|
| W_1 | 0.3 | Ancho del filtro Zona 1 |
| Lh_1 | 11.4 | Longitud horizontal del filtro Zona 1 |
| Lv_1 | 9.06 | Longitud vertical del filtro Zona 1 |
| W_2 | 0.3 | Ancho del filtro Zona 2 |
| Lh_2 | 8.87 | Longitud horizontal del filtro Zona 2 |
| Lv_2 | 3 | Longitud vertical del filtro Zona 2 |
| W_3 | 0.8 | Ancho del filtro Zona 3 |
| Lh_3 | 1.8 | Longitud horizontal del filtro Zona 3 |
| Lv_3 | 6.9 | Longitud vertical del filtro Zona 3 |

Tabla 6. Parámetros del elemento unitario con filtros notch

| Marcador | Frecuencia (GHz) |
|----------|------------------|
| 1 | 3,21 |
| 2 | 3,80 |
| 3 | 5,02 |
| 4 | 5,34 |
| 5 | 5,52 |
| 6 | 6,06 |
| 7 | 6,99 |
| 8 | 8,07 |
| 9 | 3,56 |
| 10 | 5,16 |
| 11 | 5,70 |
| 12 | 7,52 |

Tabla 7. Marcadores de frecuencia elemento unitario con filtros notch

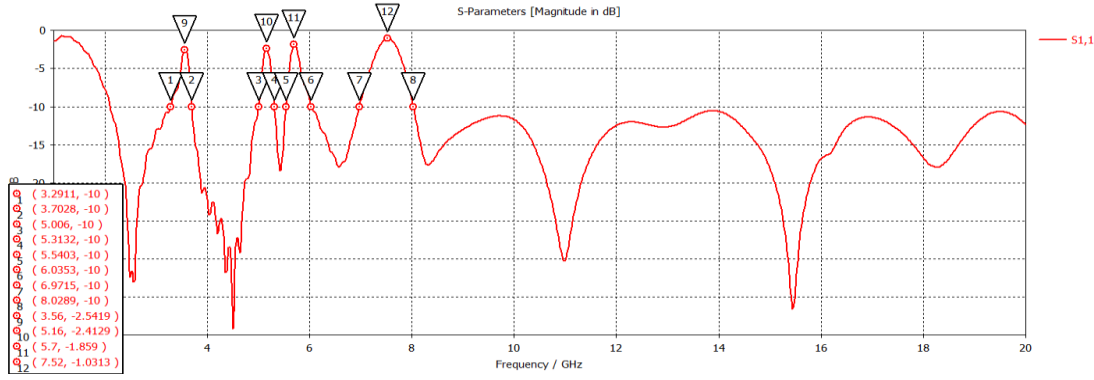


Figura 33. Parámetro S11 del elemento unitario con filtros notch

En la figura 35 es posible observar que se cumplen los requisitos establecidos para S_{11} y los filtros actúan en el rango de frecuencias que interesa eliminar.

A continuación, se muestran los resultados teóricos basadas en la fórmula 5.1, y los conseguidos en la práctica de la longitud de los filtros de las determinadas zonas de frecuencia a eliminar:

Zona 1

$$L_{zona1t} = \frac{3 \cdot 10^8}{3.5 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot \sqrt{2.25}} \approx 28.6 \text{ mm}$$

$$L_{zona2p} = 2 \cdot Lv_1 + Lh_1 \approx 29.5 \text{ mm}$$

Zona 2

$$L_{zona2t} = \frac{3 \cdot 10^8}{5.5 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot \sqrt{2.25}} = 18.18 \text{ mm}$$

$$L_{zona2p} = 2 \cdot Lh_2 + Lv_2 \approx 20.7 \text{ mm}$$

En un principio se diseña para que el filtro tenga una frecuencia de 5.5 GHz. No obstante, al estar una parte del filtro sobre el plano de masa y la otra parte del filtro no, se tendrán dos frecuencias de resonancia.

Zona 3

$$L_{zona3t} = \frac{3 \cdot 10^8}{7.5 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot \sqrt{2.25}} \approx 13.3 \text{ mm}$$

$$L_{zona3p} = 2 \cdot Lv_3 + Lh_3 \approx 15.6 \text{ mm}$$

En el *Anexo-B* se muestran los efectos de variar la longitud y la anchura de los filtros y la posición del filtro presente en el patch.

4.3 MIMO dos elementos con filtros notch

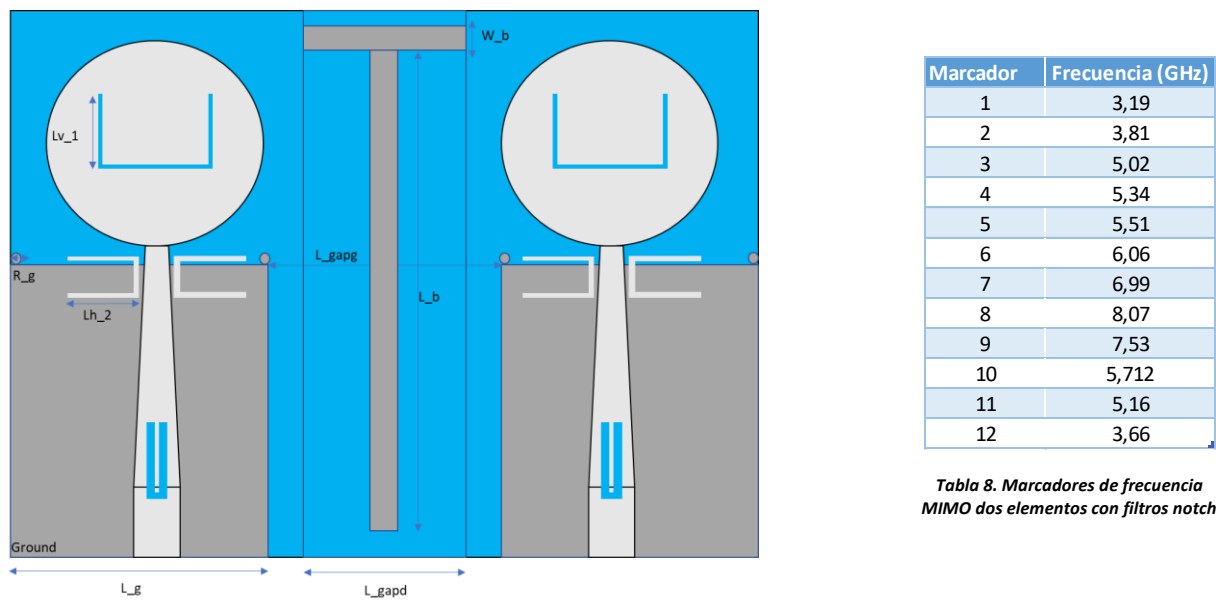


Figura 34. Representación MIMO dos elementos con filtros notch

| Parámetro | Medida (mm) | Definición |
|-----------|-------------|---|
| L_gapg | 24 | Distancia entre los planos de masa de los elementos |
| L_gapd | 16 | Ancho del dieléctrico de separación entre los elementos |
| L_b | 45 | Longitud vertical de la barrera |
| W_b | 2 | Ancho de la barrera |
| R_g | 0.5 | Radio del círculo del plano de masa |
| Lv_1 | 8.86 | Longitud vertical del filtro Zona 1 |
| Lh_2 | 8.57 | Longitud vertical del filtro Zona 2 |
| L_g | 31 | Lonfitud del plano de masa de los elementos |

Tabla 9. Parámetros de MIMO dos elementos con filtros notch

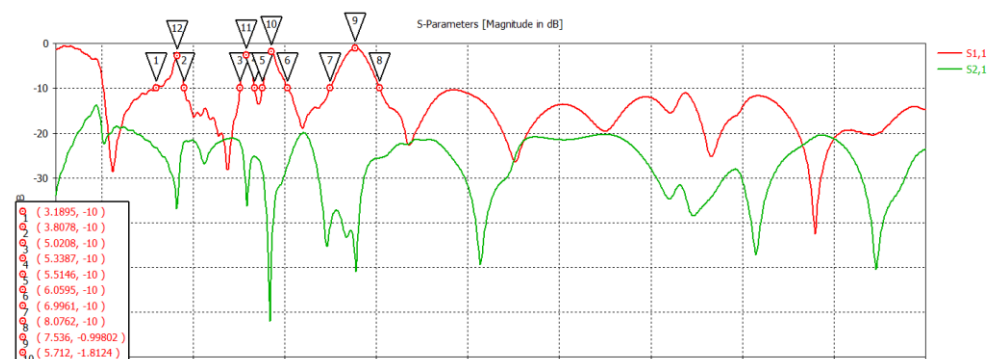


Figura 35. Parámetros S₁₁&S₁₂ de MIMO dos elementos con filtros notch

En la *figura 37* se presentan los parámetros S de la antena MIMO de dos elementos con filtros notch.

Cabe destacar que, como ya se comentó en los criterios de diseño (3.2), al ser los dos elementos que componen la antena MIMO exactamente iguales, las parejas de parámetros S_{11} y S_{22} , S_{12} y S_{21} son iguales en la simulación y por ello, se limita el estudio a un único puerto.

Tanto para S_{11} como para S_{12} se cumplen los criterios establecidos.

La variación de la longitud de los filtros de la zona 1 y de la zona 2 se debe a que por el efecto del acoplo mutuo de los elementos, los filtros se desplazan frecuencialmente y se debe ajustar su posición mediante la variación de la longitud.

En el *Anexo-3* se estudiarán tanto la necesidad de la colocación de una barrera entre elementos, la separación del plano de masa como los círculos en el plano de masa.

4.4 MIMO cuatro elementos con filtros notch

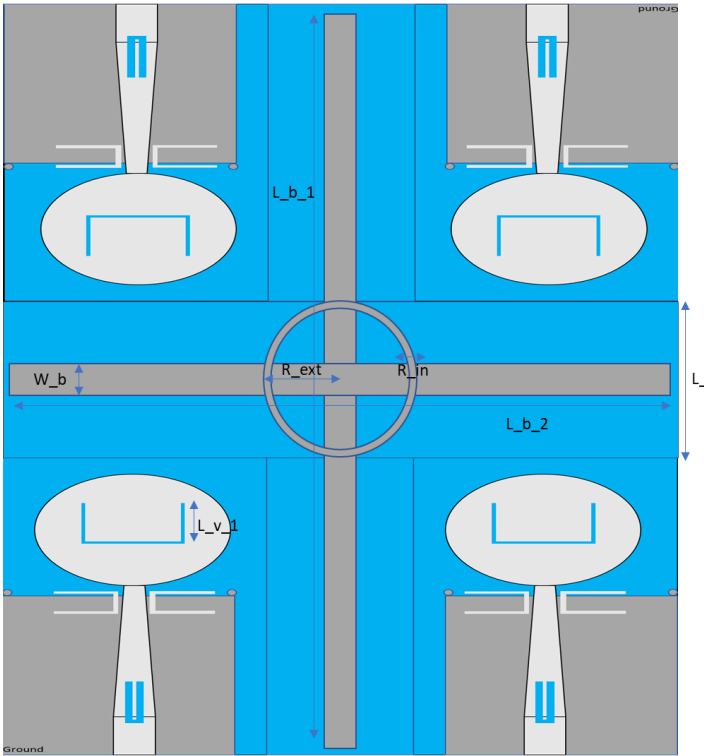


Figura 36. Representación MIMO cuatro elementos con filtros notch

| Parámetro | Medida (mm) | Definición |
|------------|-------------|---|
| L_{b_1} | 116.5 | Longitud de la barrera 1 |
| L_{b_2} | 84,5 | Longitud de la barrera 2 |
| W_b | 2 | Ancho de la barrera |
| L_{gapd} | 20 | Longitud del dieléctrico entre pares de elementos |
| L_{v_1} | 8.96 | Longitud vertical del filtro Zona 1 |
| R_{ext} | 10 | Radio externo de la circunferencia |
| R_{in} | 9 | Radio interno de la circunferencia |

Tabla 11. Parámetros de MIMO cuatro elementos con filtros notch

| Marcador | Frecuencia (GHz) |
|----------|------------------|
| 1 | 3,21 |
| 2 | 3,66 |
| 3 | 3,78 |
| 4 | 5,01 |
| 5 | 5,16 |
| 6 | 5,30 |
| 7 | 5,55 |
| 8 | 5,70 |
| 9 | 6,16 |
| 10 | 7,04 |
| 11 | 7,55 |
| 12 | 8,1 |

Tabla 10. Marcadores de frecuencia MIMO cuatro elementos con filtros notch

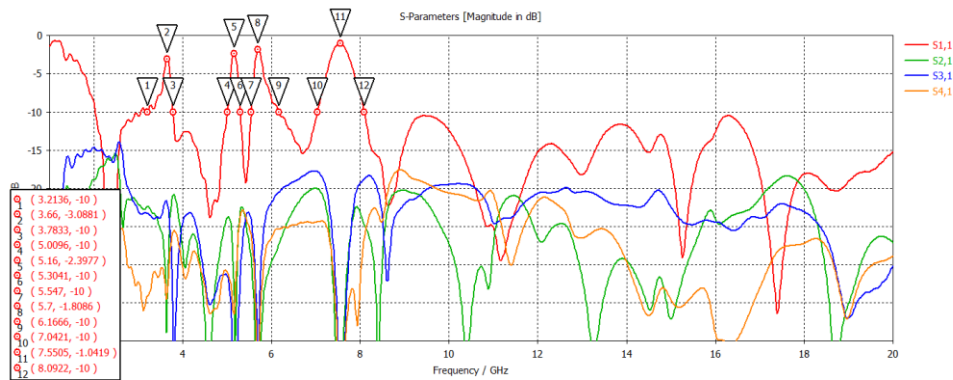


Figura 37. Parámetros S_{11} & S_{21} & S_{31} & S_{42} de MIMO cuatro elementos con filtros notch

En la figura de arriba se puede ver como se cumplen los criterios establecidos tanto para S_{11} como para los coeficientes de acoplamiento: S_{21} , S_{31} y S_{42} .

De nuevo se han tenido que variar algunas de las longitudes de los filtros ya que la inserción de dos elementos más provoca que se desplacen los filtros frecuencialmente.

En el *Anexo-D* se explica cómo influye la circunferencia situada en medio de los pares de elementos y el valor óptimo del radio interno para mejorar el aislamiento.

5 Construcción y medida de las antenas

5.1 Construcción de las antenas

La construcción de las antenas se ha realizado en el Laboratorio de Circuitos de la Escuela Politécnica. Para ello ha sido necesario exportar los archivos de construcción (gerbers) desde el programa CST para así obtener las medidas de cada antena.

Se han construido las siguientes antenas: elemento unitario con filtros notch, MIMO dos elementos con filtros notch y MIMO cuatro elementos con filtros notch



Figura 38. Parte frontal elemento unitario con filtros notch



Figura 39. Parte posterior elemento unitario con filtros notch



Figura 41. Parte frontal MIMO dos elementos con filtros notch

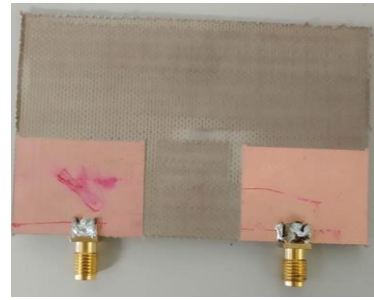


Figura 40. Parte posterior MIMO dos elementos con filtros notch

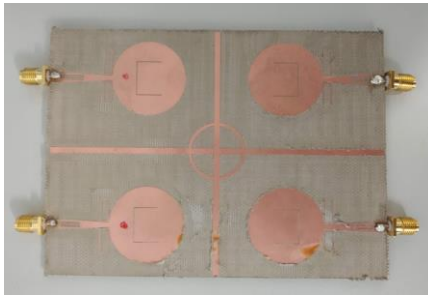


Figura 42. Parte frontal MIMO cuatro elementos con filtros notch

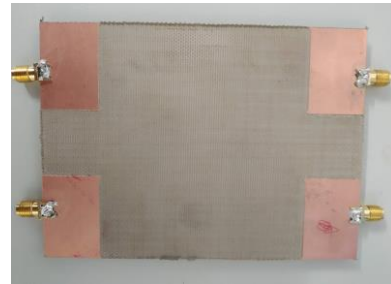


Figura 43. Parte posterior MIMO cuatro elementos con filtros notch

5.2 Medidas de las antenas

Una vez construidas las antenas, es necesario soldar a la línea de alimentación un conector; en este caso se trata de un conector tipo SMA.



Figura 44. Conector tipo SMA

El analizador de espectro que se ha usado para las medidas es el E5071C ENA Vector Analyzer. Antes de comenzar con las medidas se calibró el analizador mediante el Kit de Calibración 85032 D.

A continuación, se muestran los resultados de las medidas del analizador de espectro exportados en MATLAB, conjuntamente con los resultados teóricos.

Parámetros S

Elemento unitario con filtros con notch

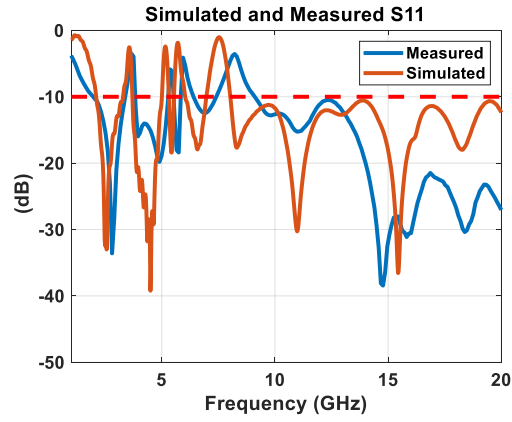


Figura 45. Comparativa parámetro S_{11} medida vs simulación elemento unitario con filtros notch

MIMO dos elementos con filtros notch

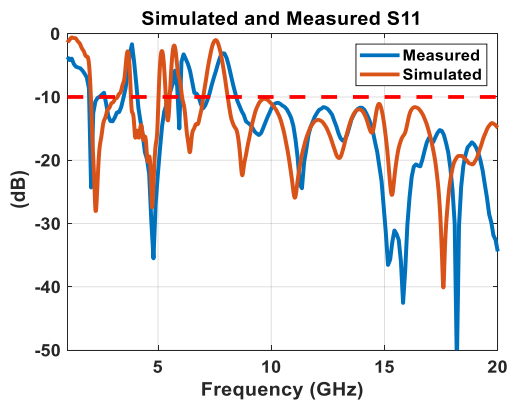


Figura 46. Comparativa parámetro S_{11} medida vs simulación MIMO dos elementos con filtros notch

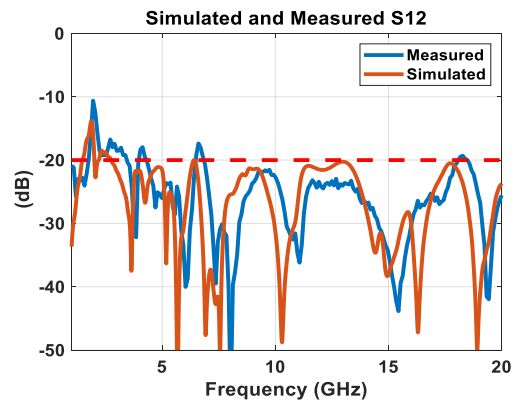


Figura 47. Comparativa parámetro S_{12} medida vs simulación MIMO dos elementos con filtros notch

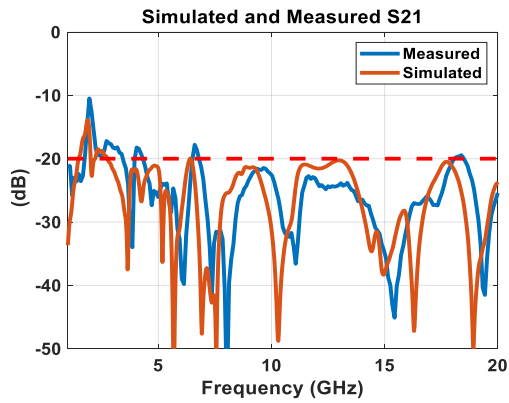


Figura 48. Comparativa parámetro S_{21} medida vs simulación MIMO dos elementos con filtros notch

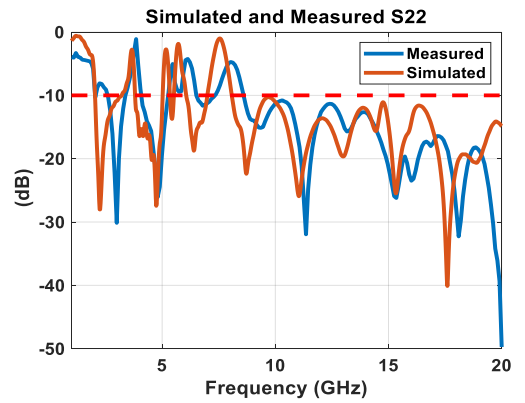


Figura 49. Comparativa parámetro S_{22} medida vs simulación MIMO dos elementos con filtros notch

MIMO cuatro elementos con filtros notch

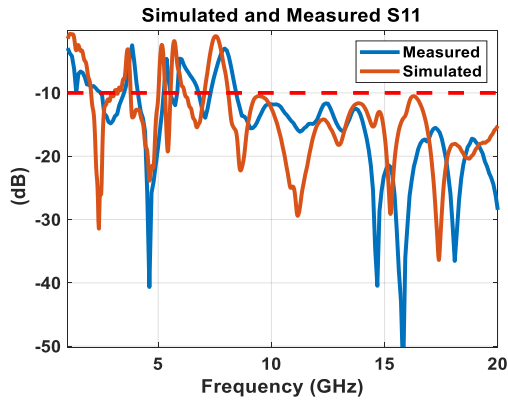


Figura 50. Comparativa parámetro S_{11} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

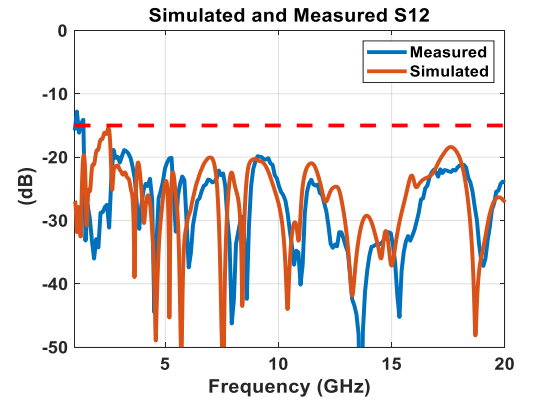


Figura 51. Comparativa parámetro S_{12} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

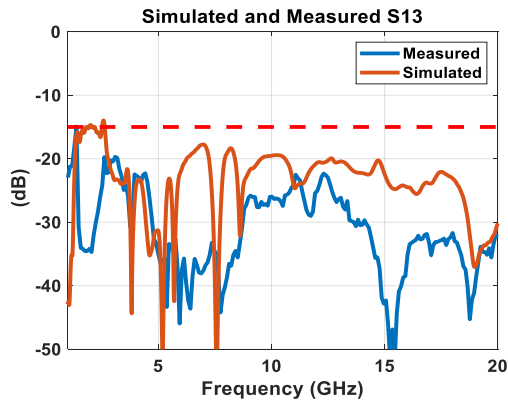


Figura 53. Comparativa parámetro S_{13} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

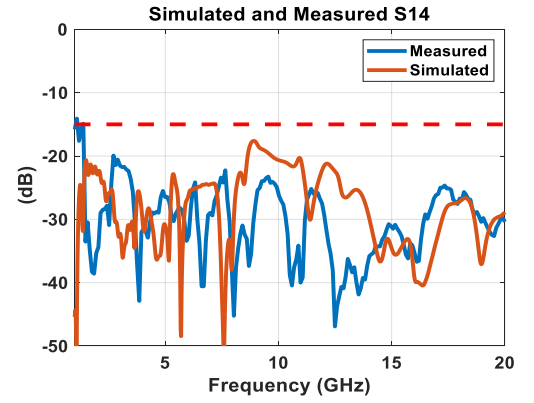


Figura 52. Comparativa parámetro S_{14} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

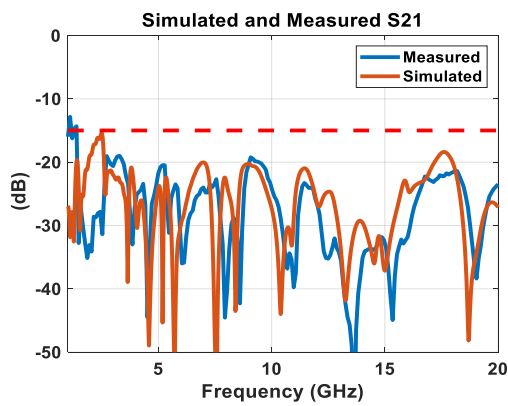


Figura 54. Comparativa parámetro S_{21} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

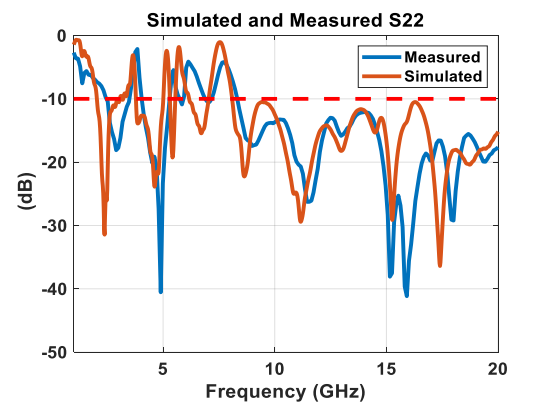


Figura 55. Comparativa parámetro S_{22} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

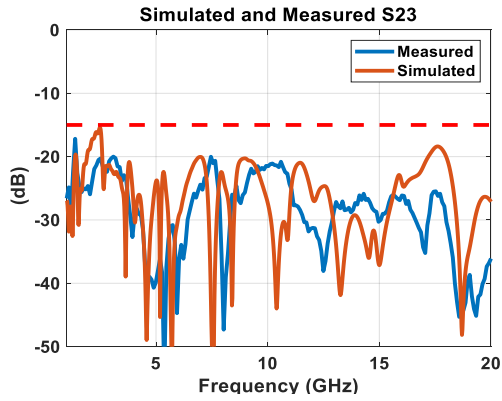


Figura 56. Comparativa parámetro S_{23} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

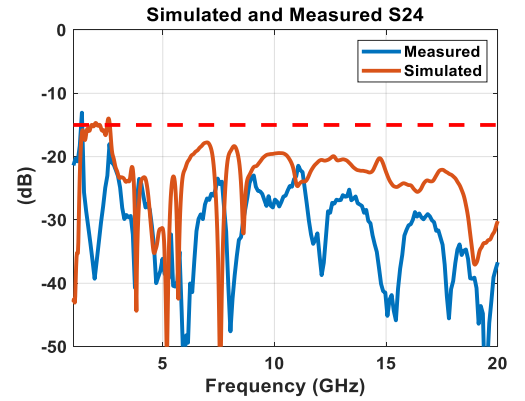


Figura 57. Comparativa parámetro S_{24} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

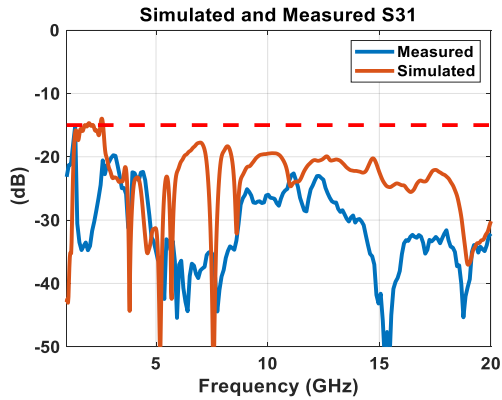


Figura 59. Comparativa parámetro S_{31} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

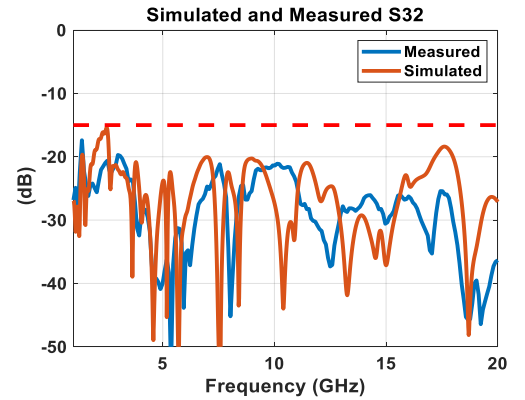


Figura 58. Comparativa parámetro S_{32} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

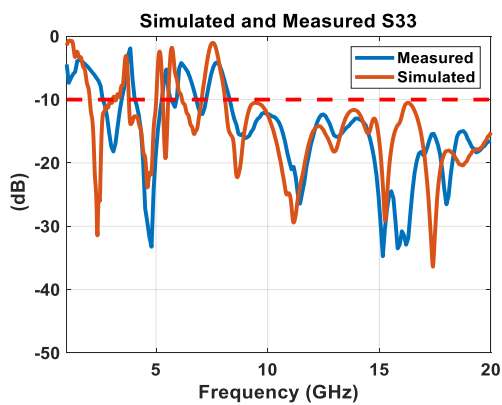


Figura 60. Comparativa parámetro S_{33} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

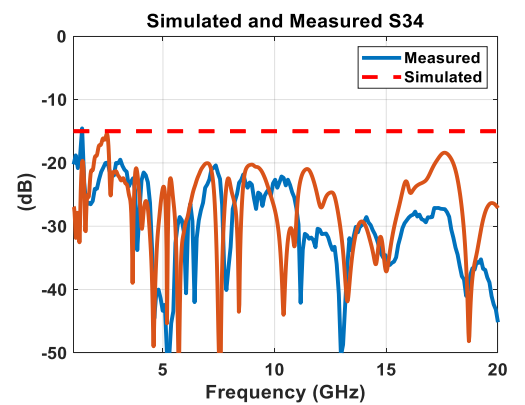


Figura 61. Comparativa parámetro S_{34} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

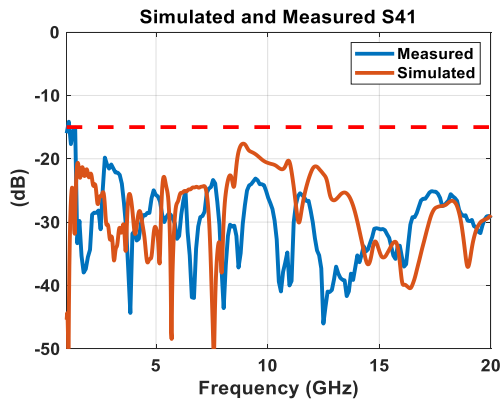


Figura 63. Comparativa parámetro S_{41} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

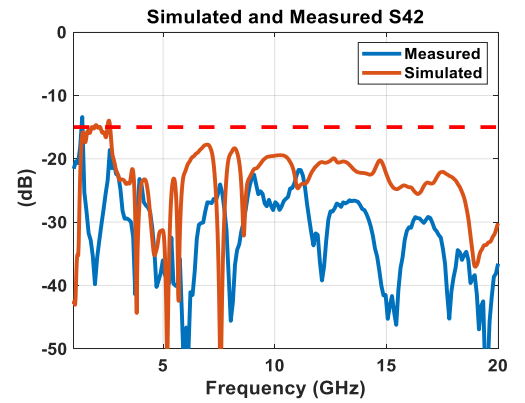


Figura 62. Comparativa parámetro S_{42} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

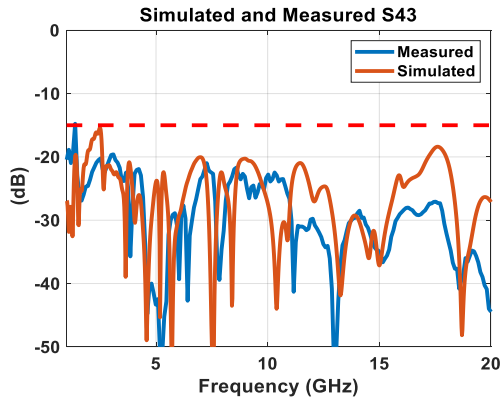


Figura 64. Comparativa parámetro S_{43} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

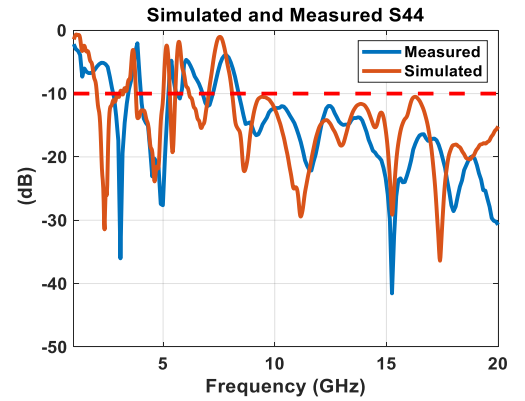


Figura 65. Comparativa parámetro S_{44} medida vs simulación MIMO cuatro elementos con filtros notch

La línea roja discontinua que aparece en las gráficas es el criterio de diseño que se ha establecido para cada caso.

Diagramas de radiación

Elemento unitario con filtros con notch

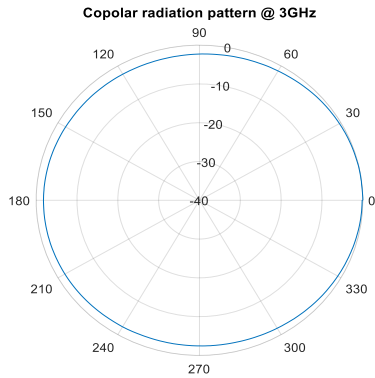


Figura 67. Diagrama de radiación copolar elemento unitario con filtros notch a frecuencia de 3 GHz

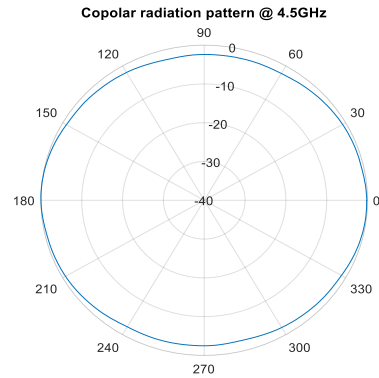


Figura 66. Diagrama de radiación copolar elemento unitario con filtros notch a frecuencia de 4.5 GHz

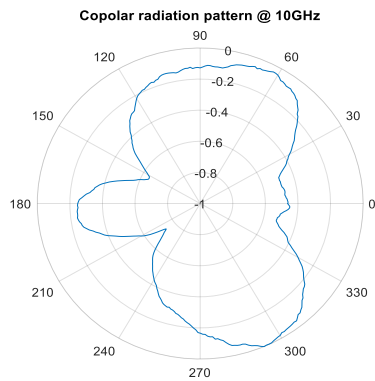


Figura 69. Diagrama de radiación copolar elemento unitario con filtros notch a frecuencia de 10 GHz

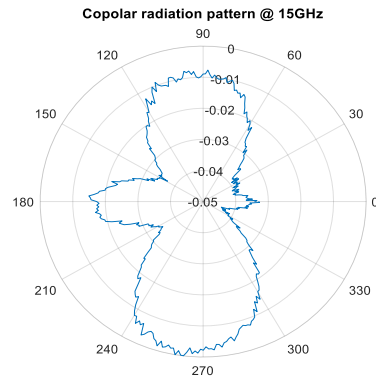


Figura 68. Diagrama de radiación copolar elemento unitario con filtros notch a frecuencia de 15 GHz

MIMO dos elementos con filtros notch

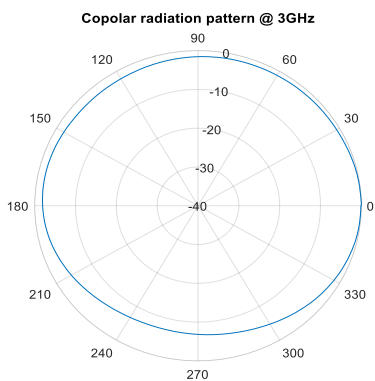


Figura 70. Diagrama de radiación copolar MIMO dos elementos con filtros notch a frecuencia de 3 GHz

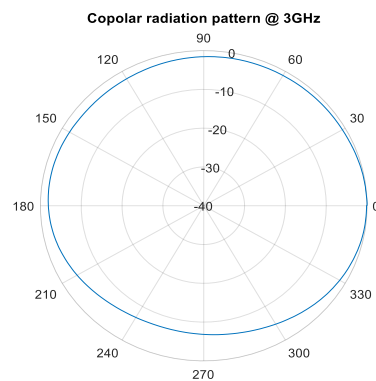


Figura 71. Diagrama de radiación copolar MIMO dos elementos con filtros notch a frecuencia de 3 GHz

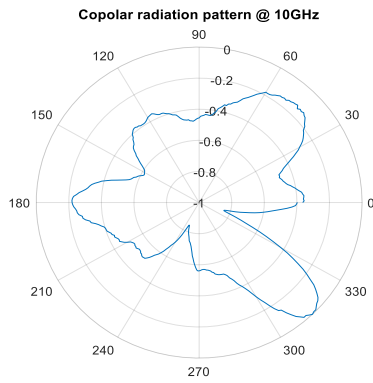


Figura 73. Diagrama de radiación copolar MIMO dos elementos con filtros notch a frecuencia de 10 GHz

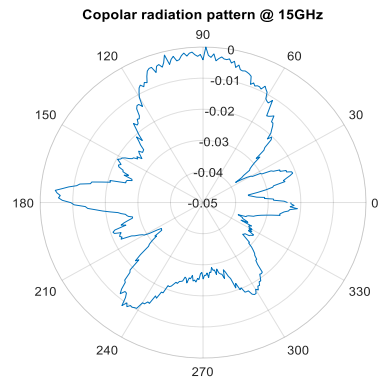


Figura 72. Diagrama de radiación copolar MIMO dos elementos con filtros notch a frecuencia de 15 GHz

MIMO cuatro elementos con filtros notch

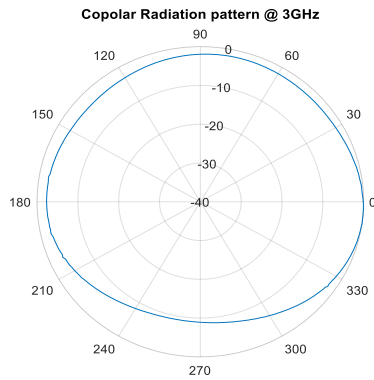


Figura 75. Diagrama de radiación copolar MIMO cuatro elementos con filtros notch a frecuencia de 3 GHz

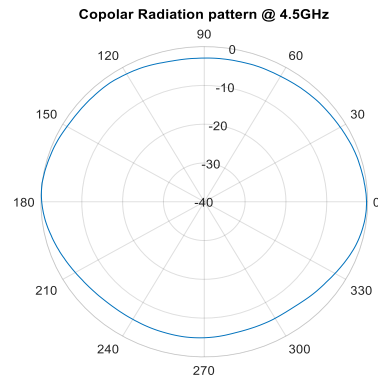


Figura 74. Diagrama de radiación copolar MIMO cuatro elementos con filtros notch a frecuencia de 4.5 GHz

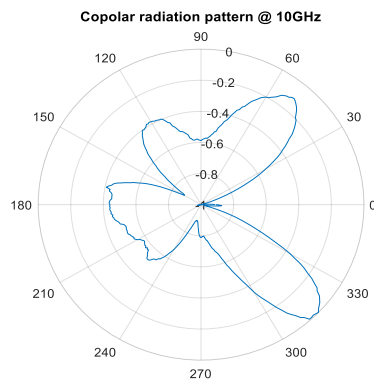


Figura 77. Diagrama de radiación copolar MIMO cuatro elementos con filtros notch a frecuencia de 10 GHz

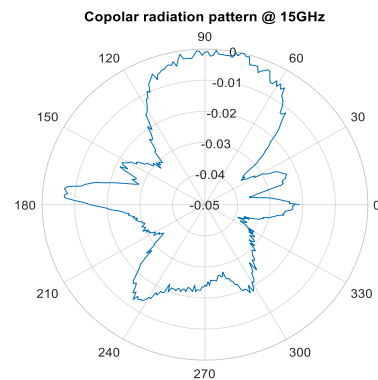


Figura 76. Diagrama de radiación copolar MIMO cuatro elementos con filtros notch a frecuencia de 15 GHz

5.3 Discusión de los resultados

Como se puede observar en las gráficas que comparan los parámetros de reflexión S_{nn} entre las simuladas en CST y las medidas en la cámara anecoica, las medidas reales presentan un desplazamiento hacia frecuencias más altas. No obstante, se observa claramente la existencia de los filtros y que se cumple en todos los elementos la condición de $S_{nn} \leq -10$ dB excepto para las frecuencias en las que están presentes los filtros.

En cuanto a los parámetros de acoplamiento S_{nm} , por norma general se consigue un mejor aislamiento que en las simulaciones como puede apreciarse, excepto para la antena MIMO dos elementos con filtros notch que sobrepasa ligeramente el criterio de $S_{12/21} \leq -20$ dB.

Como se comentó anteriormente, para las antenas con más de un elemento $S_{nm} \neq S_{nm}$ debido a que no son los elementos exactamente iguales, aunque se aprecia que los resultados son muy parecidos entre sí.

Las discrepancias existentes entre las medidas y las simulaciones se producen en gran medida por los fallos de construcción de la máquina que fabrica los circuitos impresos y por la soldadura del conector a la línea de alimentación.

6 . Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

Tras el estudio de las antenas UWB con tecnología MIMO y filtros notch realizado, se considera que poseen un grupo de características interesantes para ciertos tipos de aplicación como puede ser el uso en redes WAN.

Se ha elaborado el trabajo siguiendo el flujo de trabajo típico de un diseñador de antenas: cálculo teórico, definición de criterios, simulaciones a nivel computacional, construcción y medidas.

Se ha partido del diseño de un elemento unitario sin filtros para después insertar los filtros en las frecuencias deseadas.

Más adelante se diseñaron los elementos MIMO dos elementos con filtros y MIMO cuatro elementos con filtros.

No obstante, es importante tener en cuenta que los resultados que se miden tras la construcción de los elementos por norma general van a ser peor que los obtenidos mediante la simulación por desperfectos que se pueden originar durante el proceso de fabricación de las antenas.

6.2 Trabajo futuro

A continuación, se enumeran algunas posibles continuaciones del trabajo:

- En el presente TFG se han diseñado filtros U-shaped; se pueden insertar filtros de muchas formas y en diferentes ubicaciones dentro del parche.
- Utilización de otra tecnología que no sea la tecnología microstrip
- Filtros que afecten a otras frecuencias
- Diferentes formas de patch
- Distintas formas de alimentación

Referencias

- [1] *Encuesta sobre Equipamiento y Uso de Tecnologías de Información y Comunicación en los Hogares. Instituto Nacional De Estadística*
- [2] *Modern Antenna Handbook. Constantine A.Balanis*
- [3] *Antenas Reflectoras en microondas. José Alberto Bava*
- [4] *Proyecto Fin de Carrera Diseño de nuevas antenas ultrawide band con filtros notch integrados. Daniel Brande Hernández*
- [5] *IEE Std 145-1993 (Revision of IEEE Std 145-1983)*
- [6] *Microstrip Patch Antennas. Kai Fong Lee-Kwai Man Luk*
- [7] *Ultra Wideband Antennas. Design, methodologies and performance. Giselle M. Galvan-Tejada Marco A. Peyrot-Solis Hildeberto Jardón-Aguilar*
- [8] *Proyecto Fin de Carrera Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College. José Javier Anguís Horno*

Anexos

A Efecto del taper

El patch presenta en su borde una impedancia mucho más alta que la que se encuentra en la línea de alimentación microstrip, que es de 50Ω (aproximadamente). Por ello es necesario que exista un transformador de impedancias entre la línea de alimentación y el patch para evitar que se produzca una desadaptación de impedancias y por ende la antena no consiga buenos resultados en adaptación.

En la *figura 78* se puede observar distintas representaciones del parámetro S_{11} para una serie de valores de la variable *widtht* que es la que define el ancho del taper.

Como se ejemplifica en la gráfica, para valores de anchura mayores se obtiene una peor respuesta de la antena ya que cuanto más anchura posea una línea de transmisión menor será su impedancia característica y viceversa.

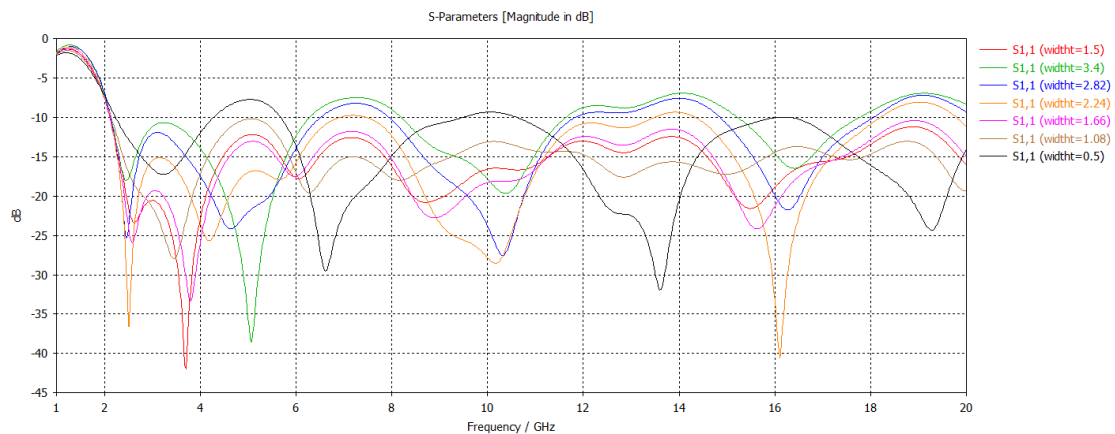


Figura 78. Parámetros S_{11} variación anchura del taper

B Variación parámetros de los filtros

Para el desarrollo de este anexo, se va a basar el estudio de la variación de los parámetros de los filtros con el filtro presente en el patch circular que es el que afecta a la zona 1 (3.3-3.7 GHz)

Longitud

Como ya se ha mencionado antes, la longitud de un filtro viene dada por la ecuación 2.25. De ella se puede extraer que para mayores longitudes se obtienen frecuencias de resonancia menores. Este efecto se puede observar en la figura 79.

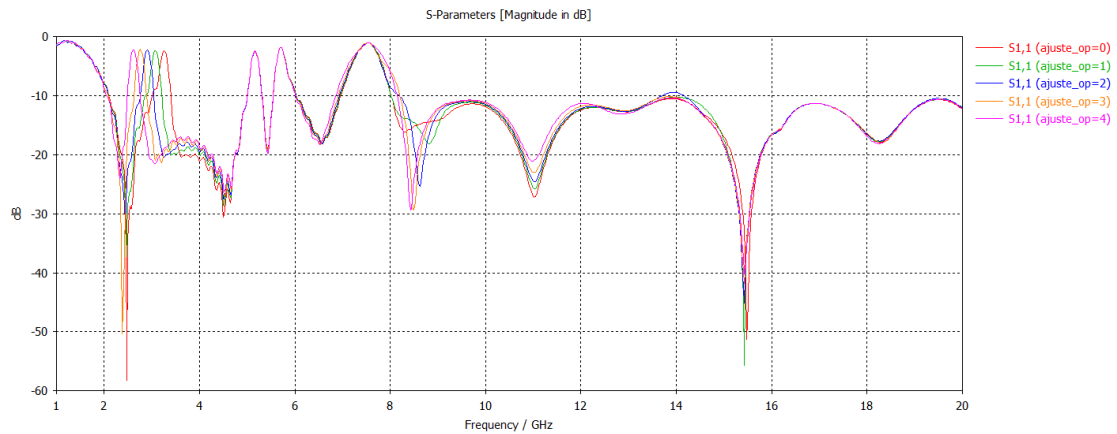


Figura 79. Parámetros S_{11} variación de la longitud

Anchura

Con la anchura del filtro variamos el rango de frecuencias al que afecta. De la figura 47 podemos extraer que cuanto más ancho sea la línea del slot más ancho de banda abarcará el filtro, donde w_{ff} es el ancho de la línea del slot.

También podemos observar cómo se produce una variación de la posición frecuencial del filtro debido a que al aumentar la anchura del slot se disminuye la longitud de este y por tanto se desplaza hacia frecuencias mayores.

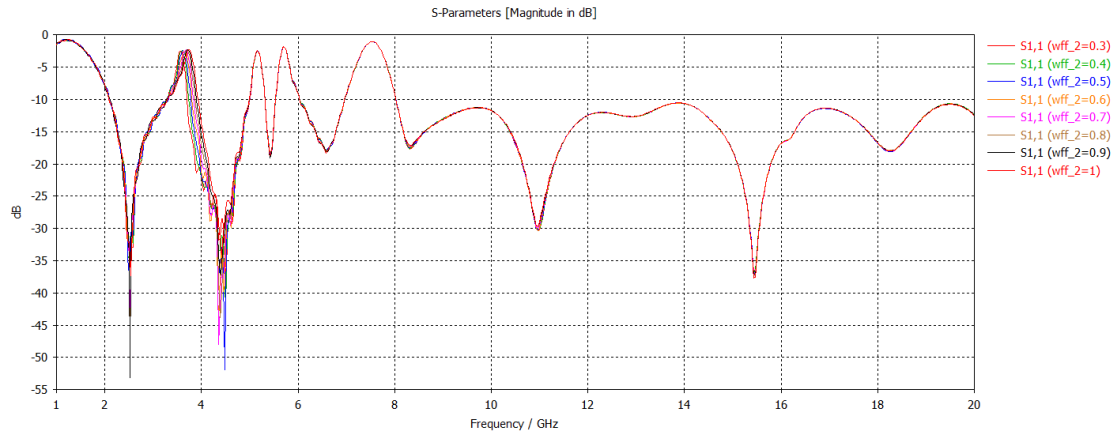


Figura 80. Parámetros S_{11} variación de la anchura

Posición del filtro

La posición del filtro dentro del patch se varía mediante el parámetro u_{b_1} . Cuanto mayor es su valor más cerca del taper se encuentra.

De la figura de abajo se puede extraer que cuanto más cerca del taper se encuentra el filtro se obtiene una mayor amplitud. Sin embargo, ya que la longitud del filtro está modelada por la longitud de un monopolo por la ecuación 2.25, se deben de tener en cuenta las frecuencias armónicas:

$$(n + 1)f \quad (B.1)$$

Donde n es un número entero y f la frecuencia de resonancia del filtro.

Es por esta razón por lo que aumenta la amplitud en las zonas de 10.5 GHz, 14 GHz y 17.5 GHz.

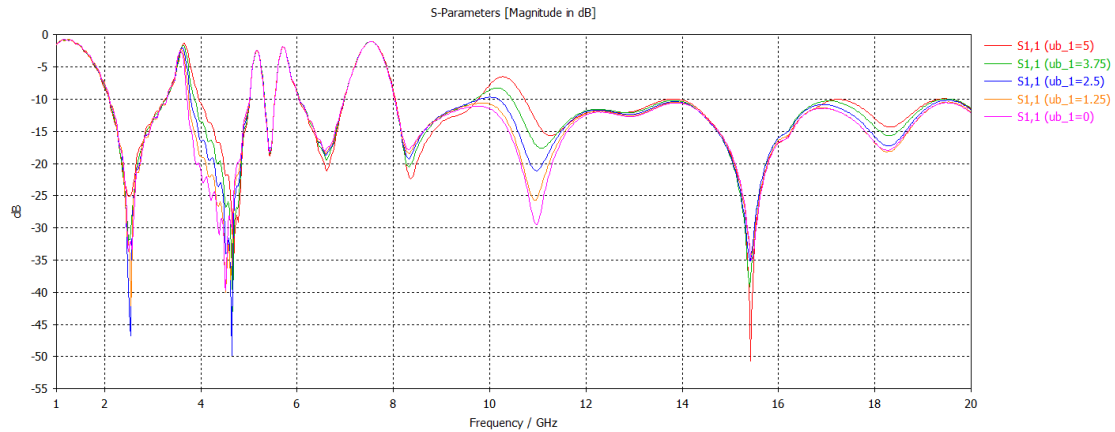


Figura 81. Parámetros S_{11} variación de la posición

C Inserción de componentes aislantes entre elementos

En esta sección se estudiarán las diversas acciones que se pueden realizar para conseguir mejorar los parámetros S_{nm} , que son los parámetros cruzados. Este estudio se realiza sobre la antena MIMO de dos elementos con filtros notch.

Al haber ahora dos elementos, se producirá una transferencia de potencia entre estos. Interesa que dicha transferencia de potencia se lo mas pequeña posible.

Barrera

Se coloca una barrera entre los dos elementos. Abajo se puede ver una comparativa entre los parámetros S_{11}/S_{22} y S_{12}/S_{21} con y sin barrera.

En cuanto a los parámetros S_{12}/S_{21} se obtiene un mejor resultado con la barrea y en cuanto a los parámetros S_{11}/S_{22} , se puede apreciar como debido a la inserción de la barrera se modifican las frecuencias de los filtros. No obstante, se ha considerado que la modificación de estas frecuencias no es demasiado relevante, dando por válido este resultado

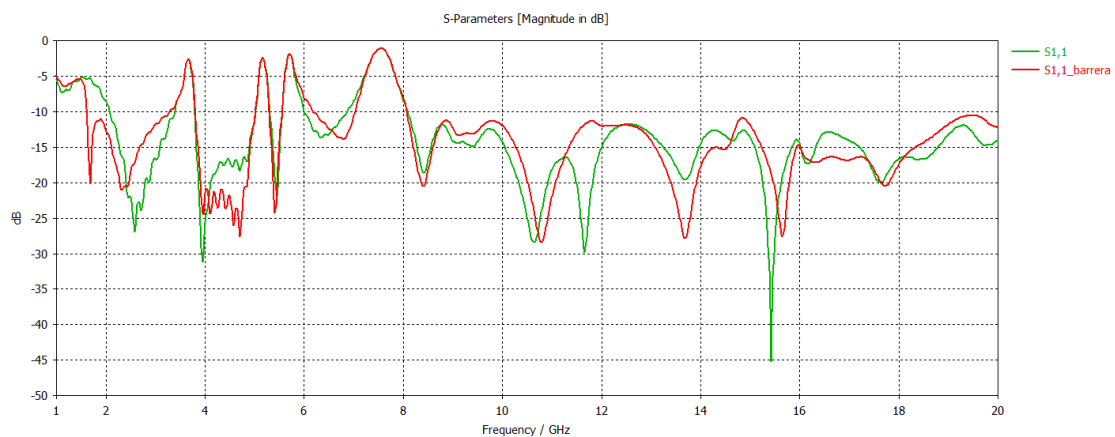


Figura 82. Parámetros S_{11} comparación sin/con barrera

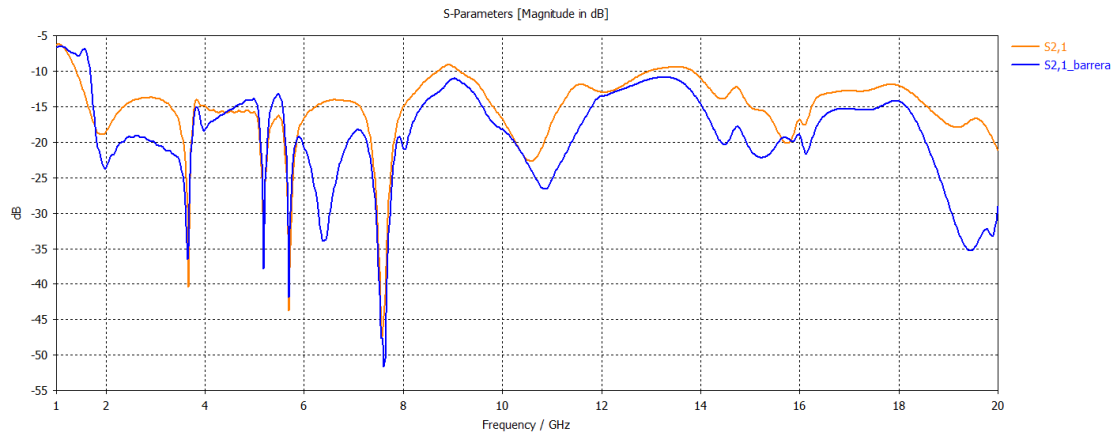


Figura 83. Parámetros S_{21} comparación sin/con barrera

Separación plano de masa

Aunque con la inserción de la barrera se obtiene un mejor resultado que sin ella, el aislamiento entre elementos no es aceptable. Para mejorarlo, se plantea a continuación, la separación del plano de masa que tienen los elementos para así tener mayor independencia cada uno al no tener elementos comunes.

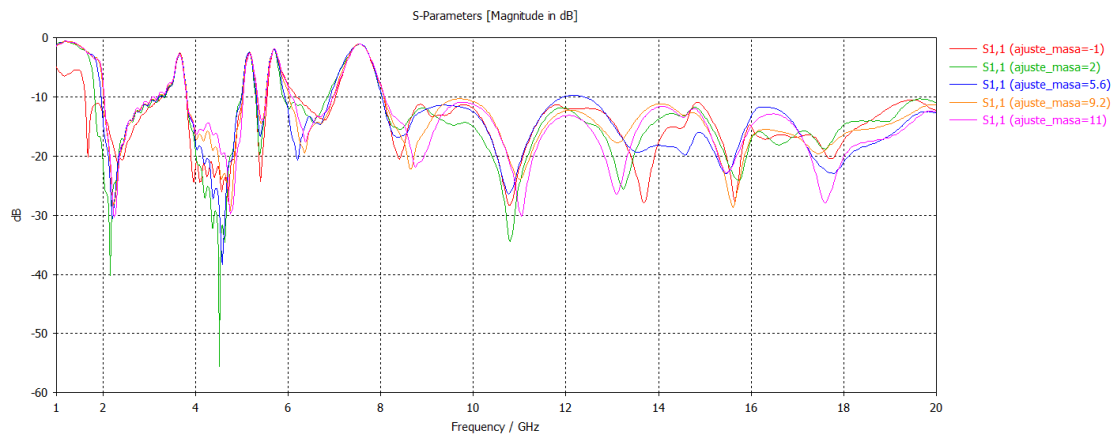


Figura 84. Parámetros S_{11} variación separación plano de masa

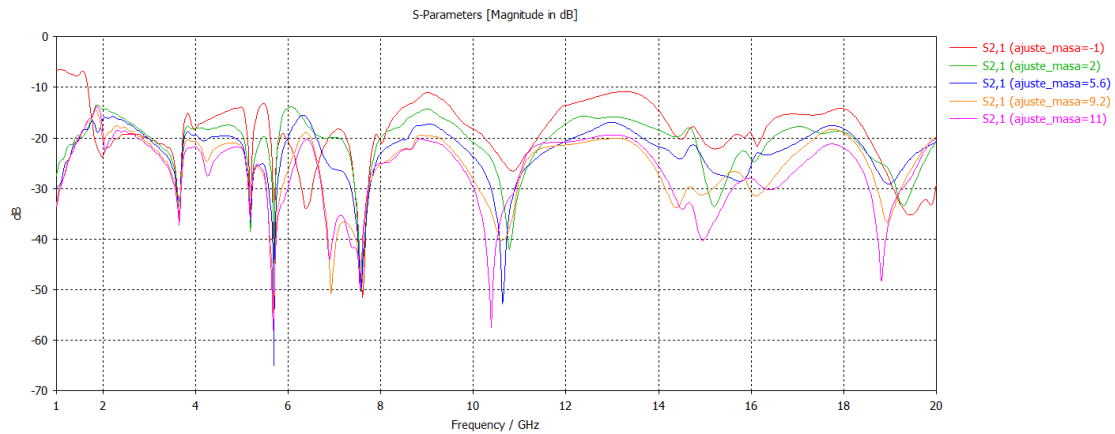


Figura 85. Parámetros S_{21} variación separación plano de masa

Los resultados muestran una variación de la separación del plano de masa desde -1mm, sin separación, hasta 11 mm que es el valor utilizado. Se puede observar cómo al aumentar la separación del plano de masa mejora el aislamiento entre elementos.

Inserción de círculos en el plano de masa

Por último, se plantea en este TFG la utilización de unos círculos de radio 0.5mm en los extremos de cada plano de masa, para incrementar el aislamiento entre elementos. En la figura inferior se muestra una comparativa entre tener y no tener estos círculos en el plano de masa.

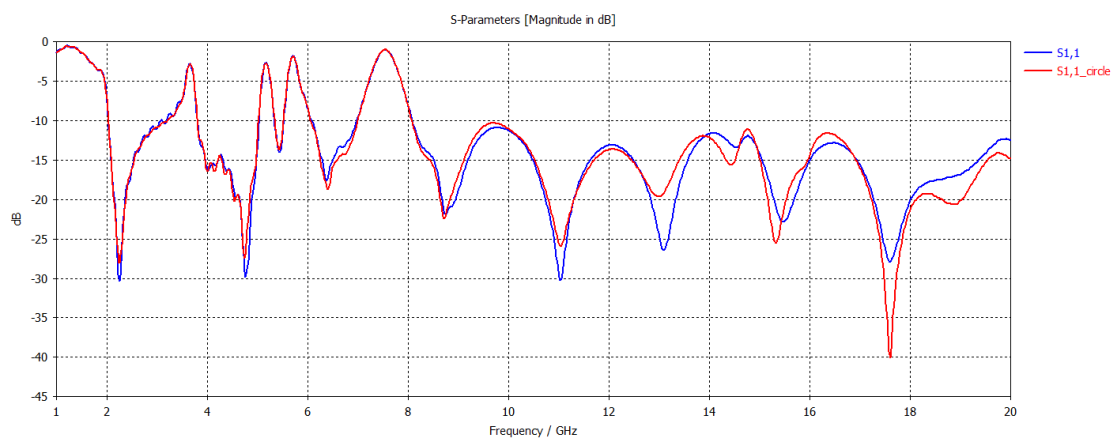


Figura 86. Parámetros S_{11} comparación sin/con círculos

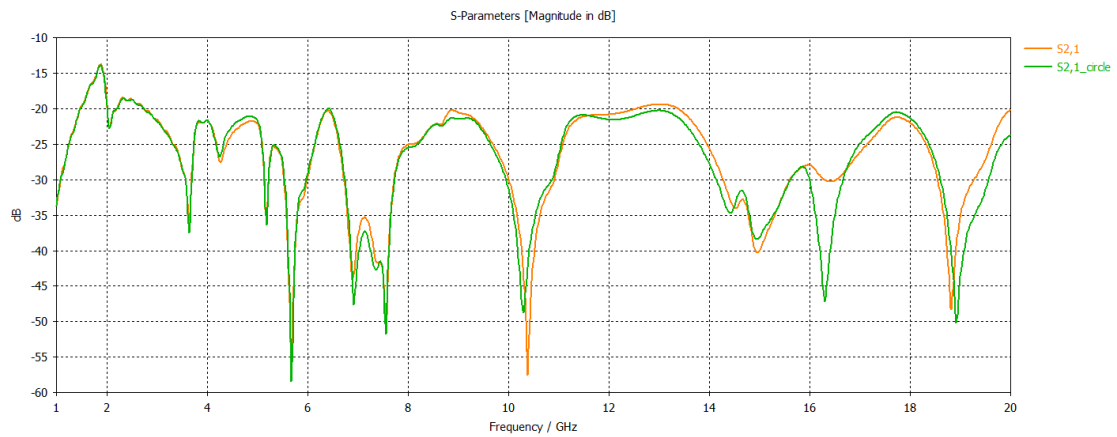


Figura 87. Parámetros S_{21} comparación sin/con círculos

De la comparativa se puede concluir que en los parámetros S_{11}/S_{22} no existe una diferencia reseñable, sin embargo, con la inserción de los círculos en los planos de masa se consigue cumplir el requisito de $S_{12}/S_{21} \leq -20\text{dB}$.

D Variación del radio circunferencia central

Como se puede observar en la figura 36, en la antena MIMO de cuatro elementos con filtros notch se ha incluido una circunferencia en el centro del patch para aumentar el aislamiento entre elementos.

El radio exterior de la circunferencia es de 10 mm de manera que quede centrado en el patch.

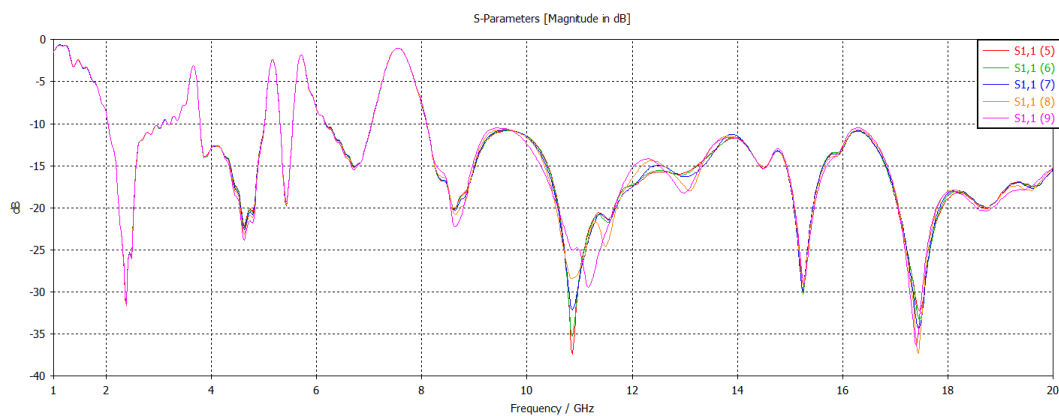


Figura 88. Parámetros S_{11} variación del radio interno de la circunferencia

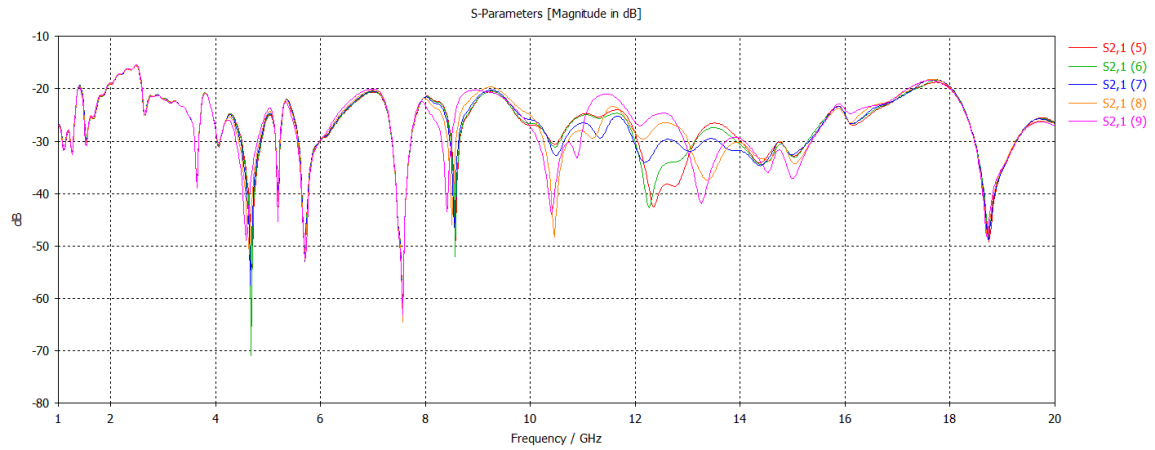


Figura 89. Parámetros S_{21} variación del radio interno de la circunferencia

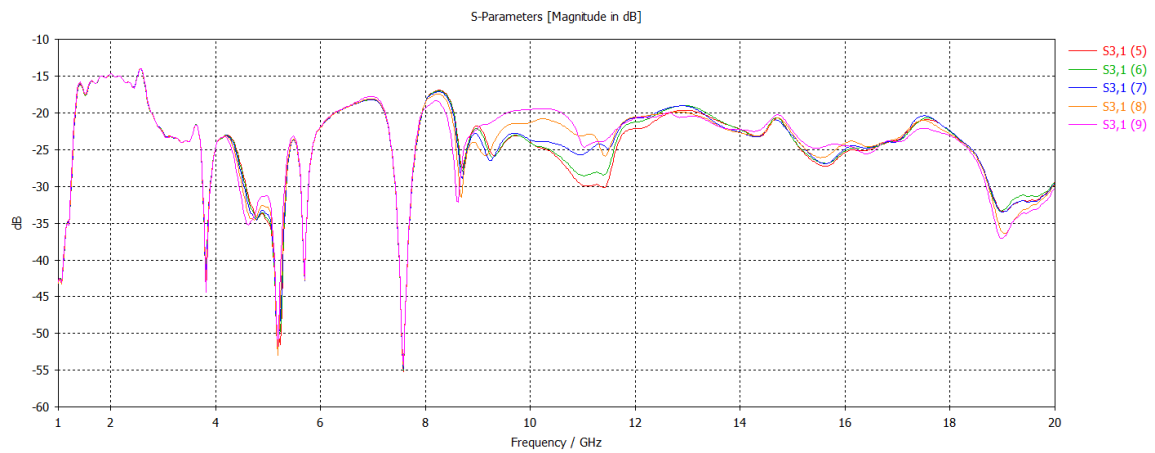


Figura 90. Parámetros S_{31} variación del radio interno de la circunferencia

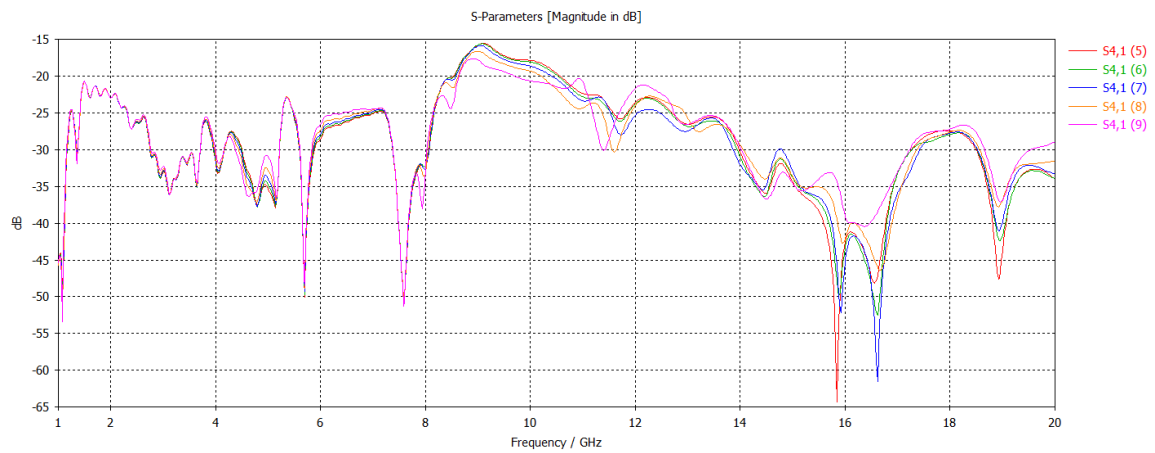


Figura 91. Parámetros S_{41} variación del radio interno de la circunferencia

En las figuras anteriores se refleja un barrido paramétrico del radio interno de la circunferencia de 5 a 9 mm. De manera general, el radio de 9mm es la que cumple los requisitos expuestos en los criterios de diseño para un mayor rango de frecuencias y es por ello por lo que se elige este radio.

E Simulación hasta 50 GHz

En este apartado se muestra la simulación hasta 50 GHz de los parámetros S de la antena MIMO de dos elementos con filtros notch y la antena MIMO con cuatro elementos con filtros notch.

MIMO dos elementos con filtros notch

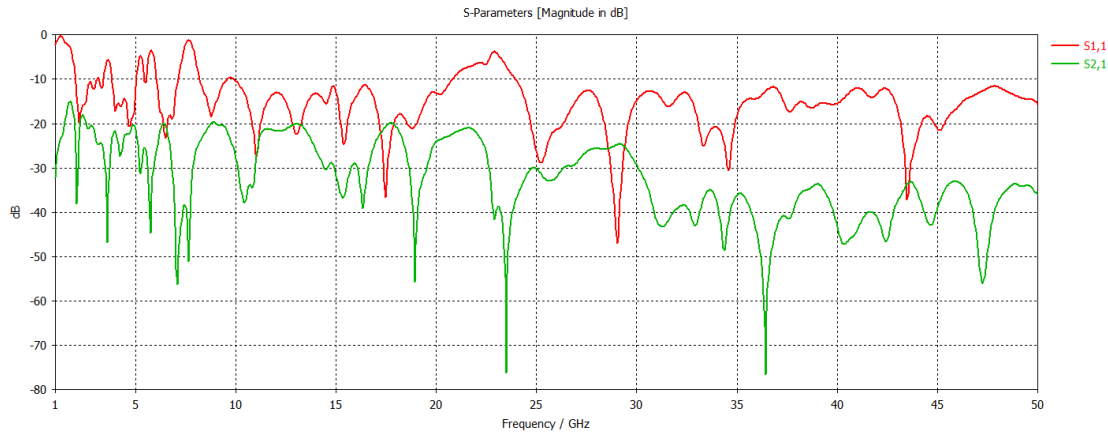


Figura 92. Parámetros S_{11} & S_{21} MIMO dos elementos con filtros notch hasta 50GHz

MIMO cuatro elementos con filtros notch

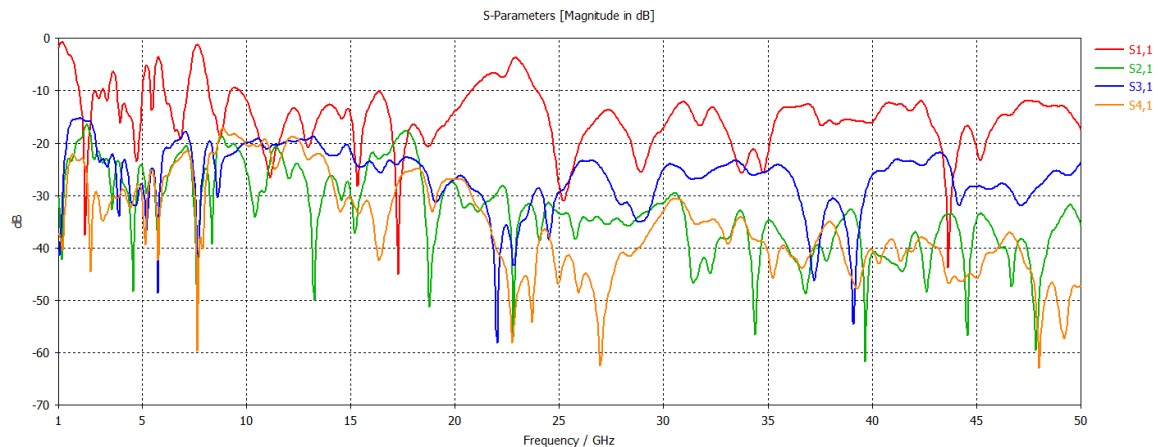


Figura 93. Parámetros S_{11} & S_{21} & S_{31} & S_{41} MIMO cuatro elementos con filtros notch hasta 50GHz

Ambas antenas presentan problemas en los parámetros S_{mm} de 21 a 24 GHz debido a que, como indica la fórmula *B.1*, en esa zona está presente la frecuencia armónica del filtro centrado en 7.5 GHz y, por lo tanto, si se quisiese utilizar hasta este rango de frecuencias se debería añadir un filtro en torno a esas frecuencias.

